



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
DEPTO. DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**



**ANÁLISE POR ULTRA-SOM DA TEXTURA DOS MATERIAIS E  
TENSÕES RESIDUAIS EM JUNTAS SOLDADAS**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE  
SANTA CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**MESTRANDA: CLEIDE M. MARQUEZE**

**FLORIANÓPOLIS / SC  
JULHO / 2002**

# **ANÁLISE POR ULTRA-SOM DA TEXTURA DOS MATERIAIS E TENSÕES RESIDUAIS EM JUNTAS SOLDADAS**

**CLEIDE M. MARQUEZE**

Esta dissertação foi julgada para obtenção do título de

**MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA  
FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

---

**Prof. Augusto J. de A. Buschinelli, Dr. Ing. - Orientador**

---

**Prof. José A. Bellini da Cunha Neto, Dr. Eng. - Coordenador do Programa**

**BANCA EXAMINADORA:**

---

**Marcelo de Siqueira Q. Bittencourt, Dr. Eng.**

---

**Prof. Carlos Enrique Niño Bohórquez, Dr. Eng.**

---

**Prof. Armando Albertazzi G. Júnior, Dr. Eng.**

## AGRADECIMENTOS

- À minha família pela paciência, compreensão e incentivo aos estudos.
- Ao prof. Augusto Buschinelli pela orientação, apoio e incentivo.
- Ao IEN/CNEN, em especial ao Eng. Marcelo de Siqueira Q. Bittencourt pelo compartilhamento de suas pesquisas com relação à análise de tensões residuais por ultra-som com o Laboratório de Soldagem da UFSC.
- Ao CENPES/ PETROBRÁS, em especial ao Eng. Roberto Carneval, pelo apoio financeiro, o qual possibilitou a realização desta pesquisa.
- Aos Laboratórios de Materiais da Eng. Mecânica, Civil e ETFSC pelo apoio na realização dos ensaios.
- Aos engenheiros, técnicos e bolsistas do Labsolda/UFSC pela ajuda na preparação dos corpos de prova e realização dos ensaios.
- Aos colaboradores da Fundação CERTI pela presteza e apoio ao trabalho.
- Ao Eng. Alexander Espinosa Hernández pelo desenvolvimento dos programas de aquisição e processamento de sinais os quais foram fundamentais para a realização deste trabalho.
- A todo povo brasileiro pois, na verdade toda a estrutura universitária existe graças a eles que a mantêm através do pagamento de impostos, que são gerados de seus trabalhos.

## SUMÁRIO

<b>Lista de abreviaturas.....</b>	<b>vii</b>
<b>Lista de símbolos.....</b>	<b>viii</b>
<b>Resumo.....</b>	<b>x</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>xi</b>
<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Revisão bibliográfica.....</b>	<b>3</b>
2.1. Tensões residuais.....	3
2.2. Tensões residuais na soldagem.....	3
2.3. Métodos para a determinação das tensões residuais nos materiais.....	9
2.3.1. Difração de raios-x.....	9
2.3.2. Difração de nêutrons.....	10
2.3.3. Método do furo cego com extensômetros.....	10
2.3.4. Método do furo com técnicas ópticas.....	12
2.4. Técnica ultra-sônica para a avaliação da textura dos materiais e medição das tensões residuais.....	15
2.4.1. Velocidade das ondas ultra-sônicas.....	16
2.4.2. Acustoelasticidade e birrefringência.....	19
2.4.3. Técnicas de medições da velocidade da onda ultra-sônica.....	31
2.4.4. A textura dos materiais.....	32
2.4.5. Determinação por ultra-som das tensões residuais em juntas soldadas.....	36
<b>3. Materiais e métodos.....</b>	<b>39</b>
3.1. Componentes do sistema de medições por ultra-som.....	41
3.2. Sistema desenvolvido para o processamento do sinal ultra-sônico adquirido.....	45

3.3. Determinação da textura de chapas de aço.....	45
3.3.1. Determinação da direção de laminação por metalografia.....	46
3.3.2. Determinação da direção de laminação por ultra-som.....	47
3.4. Birrefringência acústica do aço ABNT 1012.....	48
3.5. Determinação da constante acustoelástica do material através do ensaio ultra-sônico...	49
3.6. Determinação por ultra-som, das tensões principais atuando na peça soldada.....	52
3.7. Determinação pelo método do furo com extensômetros, das tensões principais atuando na peça soldada.....	54
<b>4. Resultados e discussão.....</b>	<b>55</b>
4.1. Avaliação comparativa da textura de chapas de aço por metalografia e ultra-som.....	55
4.1.1. Chapa de aço ABNT 1010 laminado a quente.....	55
4.1.2. Chapa de aço ABNT 1045 laminada a frio.....	56
4.1.3. Chapa de aço ASTM A516 grau 70 laminada a quente.....	56
4.1.4. Chapa de aço ABNT 1012 laminada a quente.....	60
4.2. Verificação da confiabilidade do programa de processamento de sinais (MATLAB) do Labsolda.....	65
4.3. Análise da birrefringência acústica de chapas de aço ABNT 1012.....	66
4.3.1. Análise do CP de tração.....	66
4.3.2. Análise da birrefringência das chapas de aço ABNT 1012 (antes da soldagem).....	70
4.3.3. Análise da birrefringência das chapas de aço ABNT 1012 (após a soldagem).....	72
4.4. Determinação da constante acustoelástica do material.....	75
4.5. Determinação por ultra-som das tensões principais atuando na chapa soldada.....	78
4.6. Determinação das tensões principais na peça soldada pelo método do furo com extensômetros.....	87

<b>5. Conclusões finais.....</b>	<b>91</b>
<b>6. Sugestões para trabalhos futuros.....</b>	<b>93</b>
<b>7. Referências bibliográficas.....</b>	<b>95</b>
<b>Anexo A.....</b>	<b>101</b>
<b>Anexo B.....</b>	<b>105</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS

**CP** = corpo de prova.

**DL** = direção de laminação.

**DP** = direção de polarização.

**DAC** = direção de aplicação da carga.

**ZAC** = zona afetada pelo calor.

**ASTM** = American Society for Testing of Materials.

**TIG** = Tungsten Inert Gas.

**MIG** = Metal Inert Gas

**A/D** = analógico/digital.

**ABNT** = Associação Brasileira de Normas Técnicas.

**SAE** = Society of Automotive Engineers.

**MPa** = mega pascal.

**CA** = corrente alternada.

**ns** = nanosegundo.

**mV** = milivolt.

**pV** = picovolt.

**t** = tonelada

**IEN** = Instituto de Engenharia Nuclear

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta$  = variação

$\theta$  = Temperatura.

$\sigma_e$  = Tensão de escoamento.

$\sigma_t$  = Tensão transversal.

$\sigma_l$  = Tensão longitudinal.

$V_L$  = Velocidade da onda longitudinal.

$V_C$  = Velocidade da onda cisalhante.

$V_S$  = Velocidade da onda superficial.

$E$  = Módulo de Young.

$\rho$  = Densidade.

$\nu$  = Coeficiente de Poisson.

$G$  = Módulo de cisalhamento.

$\rho_0$  = densidade inicial.

$V_{L1}$  = velocidade da onda longitudinal se propagando na direção 1, com o deslocamento das partículas também na direção 1.

$V_{ij}$  = velocidade da onda cisalhante se propagando na direção i, com o deslocamento das partículas na direção j.

$\lambda$  e  $\mu$  = Constantes elásticas de segunda ordem (constantes de Lamé).

$l$ ,  $m$  e  $n$  = Constantes elásticas de terceira ordem (constantes de Murnaghan).

$\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  e  $\alpha_3$  = Componentes das deformações principais nas direções 1, 2 e 3.

$\epsilon$  = Deformação.

$K$  = Módulo volumétrico.

$k$  = constante acustoelástica normalizada.



**B** = Birrefringência.

**B<sub>0</sub>** = Birrefringência inicial.

**m** = constante acustoelástica do material.

**φ** = Ângulo entre as direções das tensões principais e a direção de simetria ortotrópica do material.

**σ<sub>1</sub>** e **σ<sub>2</sub>** = Tensões principais atuando no material.

## RESUMO

Neste trabalho foi desenvolvida e aplicada uma metodologia experimental para se analisar a textura dos materiais bem como medir as tensões residuais geradas pela soldagem, através do emprego do ultra-som utilizando-se a técnica da birrefringência acústica. A bancada experimental consistiu de um aparelho de ultra-som, um transdutor piezoelétrico de ondas cisalhantes com incidência normal, osciloscópio digital e um microcomputador. Para a aquisição de dados instalou-se no microcomputador uma placa de aquisição compatível com a interface GPIB e desenvolveu-se um programa no ambiente Windows que permitiu a aquisição de dados e seu posterior armazenamento no microcomputador. Uma vez que as variações de velocidade em função das tensões resultam em alterações do tempo de percurso da onda ultra-sônica da ordem de nanosegundos, foi necessário realizar medidas do tempo com elevada precisão e resolução. Para isto foi desenvolvido um programa computacional para aumentar a taxa de amostragem e processar o sinal através da correlação cruzada. Inicialmente fez-se um estudo da determinação da textura (direção de laminação) por ultra-som de algumas chapas de aço, para comparação com a análise metalográfica. Posteriormente analisou-se uma chapa de aço (ABNT 1012), quanto às tensões originadas pela soldagem, traçando-se curvas de distribuição de tensões paralelas e perpendiculares ao cordão de soldagem. O trabalho mostrou que a técnica da birrefringência pode ser utilizada para a avaliação da direção de laminação de chapas de aço bem como, para a avaliação da distribuição de tensão residual em chapas soldadas. Os resultados da distribuição de tensões transversais e longitudinais são discutidos e comparados com o levantamento das tensões residuais medidos com a técnica do furo cego (extensometria).

## **ABSTRACT**

This work describes an experimental methodology based on the birefringence technique, which was developed and applied to analyse material texture and to measure residual stresses induced by welding process. The experimental system consisted of an ultrasonic equipment, a piezoelectric transducer with shear waves, a digital oscilloscope and a microcomputer. For data acquisitions it was installed an acquisition card in the computer which is compatible with the GPIB interface. Besides that, a program under Windows was developed which permitted the data acquisition and storage in the computer. As the ultrasonic wave speed changes with stresses in a magnitude of the time of flight in the range of nanoseconds, it was necessary to carry out measures of the time with high precision and resolution. For that a computational program was developed in order to increase the signal sampling rates and processing by cross correlation. Firstly the texture determination (rolled direction) of the different steel was studied by ultrasonic waves and compared to metallographic analysis. After that the residual stresses induced by the welding process in a mild steel plate (ABNT 1012) was analysed. The results of the stresses distribution parallel and transverse to the welding direction was discussed and compared to results from the blind hole drilling method with strain gage.

## 1. Introdução

As tensões residuais são tensões internas, que existem no material mesmo na ausência de carregamentos externos. Originam-se tanto de processos de fabricação e montagem como em serviço. Podem ser trativas ou compressivas e, em geral, são triaxiais, variando de ponto para ponto, dependendo principalmente da complexidade da geometria da peça. A menos que se faça um tratamento térmico de alívio de tensões, o que nem sempre é possível, essa tensão representa um fator significativo a ser adicionado às tensões de carregamento quando se determina a resistência de uma estrutura. O conhecimento do campo de tensões residuais, isto é, sua magnitude, orientação e distribuição, é muito importante para a segurança quando se faz o projeto de estruturas e também para a determinação do “tamanho crítico” do defeito, nos cálculos de mecânica da fratura, pois, sabe-se que a tenacidade à fratura, é influenciada pela microestrutura do material na vizinhança da trinca e também pelo nível de tensão, contribuindo com a propagação da trinca ou impedindo-a.

A avaliação de componentes soldados é muito importante por questões econômicas e por razões de segurança. A integridade destes componentes depende da ausência de defeitos que possam ser prejudiciais, da presença de tensões residuais dentro de níveis aceitáveis (se sua eliminação não for possível) e da presença de uma microestrutura apropriada com as propriedades mecânicas desejadas, para que não haja degradação sob condições de operação. Portanto, uma avaliação não destrutiva com relação aos defeitos, estado de tensões e microestrutura deve ser realizada antes e durante o serviço do componente para garantir sua integridade [Raj e Jayakumar/1997].

As tensões residuais resultantes podem alcançar níveis muito elevados, devido às altas temperaturas e/ou grau de deformação atingidos em alguns processos de soldagem, bem como também devido à restrição externa imposta às juntas. A ação combinada das tensões residuais com as tensões externas a que serão submetidos os materiais pode reduzir consideravelmente a vida

útil de uma estrutura ou equipamento, podendo em alguns casos ter resultados catastróficos. Sendo assim, existe um interesse muito grande no aprimoramento e desenvolvimento de novas técnicas que possibilitem conhecer o estado de tensões residuais no material.

Embora existam diversas técnicas de medida de tensões residuais, a maioria delas se restringe a avaliar apenas as camadas superficiais dos materiais e exige infraestrutura de laboratório. Sendo assim, permanece grande o interesse no desenvolvimento de novos métodos capazes de suprir estas lacunas ou mesmo complementar os já existentes.

Nesse contexto a técnica ultra-sônica apresenta grande destaque por ser não destrutiva, e ter como principal potencial a possibilidade de caracterização do estado de tensões em todo o volume do material. Ela se baseia em fenômenos acustoelásticos, que fazem com que uma variação no estado de tensões do material afete a velocidade da onda ultra-sônica. Porém, as grandes dificuldades no emprego desta técnica estão na resolução e exatidão nas medidas do tempo de percurso da onda ultra-sônica, uma vez que as variações de velocidade em função das tensões resultam em alterações do tempo da ordem de nanosegundos; além disso, o efeito da textura também causa variações no tempo de percurso da onda da mesma ordem de grandeza daquelas causadas pela tensão. Uma outra dificuldade é a necessidade de uma amostra de referência com a mesma microestrutura do material a ser analisado, para a determinação do seu coeficiente acustoelástico. Em decorrência disto, em princípio, não é possível se determinar as tensões residuais ao longo do cordão de solda e na zona afetada pelo calor (ZAC) [Tanala e outros/1995].

O objetivo deste trabalho foi a montagem de uma bancada experimental para analisar a textura dos materiais bem como medir as tensões residuais geradas pela soldagem, através do emprego da técnica ultra-sônica.

## **2. Revisão bibliográfica**

### **2.1. Tensões residuais**

As tensões residuais estão associadas à densidade e distribuição dos defeitos cristalinos nos materiais. As regiões onde se desenvolvem tensões residuais podem variar muito em escala, desde a ordem de grandeza atômica até grandes volumes de material, podendo ser classificadas em macroscópicas, microscópicas e submicroscópicas, conforme Masubuchi [1980].

As tensões macroscópicas estendem-se sobre grandes volumes quando comparadas com o tamanho de grão do material e por isso as deformações originadas são praticamente uniformes para muitos grãos. Um exemplo típico de região macroscópica de tensão residual é a normalmente encontrada em uma união soldada.

A tensões residuais microscópicas atuam numa área do tamanho de um grão ou parte de um grão, assim sua região de influência no equilíbrio estende-se a um número pequeno de grãos.

Tensões residuais sub-microscópicas são resultantes de imperfeições da rede cristalina, ocorrendo sempre em áreas próximas às discordâncias ou defeitos pontuais. A região de influência no equilíbrio destas tensões se estende ao longo de pequenas frações de um grão.

### **2.2. Tensões residuais na soldagem**

As tensões residuais na soldagem são tensões internas, em equilíbrio, que permanecem no material após a execução da operação de soldagem. Estas tensões são geradas por escoamentos parciais localizados, que ocorrem durante o ciclo térmico da soldagem. Podem ser tanto trativas como compressivas, dependendo da região considerada (zona fundida, zona afetada pelo calor, material de

base) e de alguns fatores tais como aporte térmico, pré-aquecimento, grau de restrição da junta, quantidade de passes de solda, velocidade de soldagem, etc.

A figura 1 apresenta um esquema mostrando as distribuições transversais de temperaturas e tensões residuais, originadas durante a deposição de material de solda, para vários pontos da chapa. Conforme se pode observar estas tensões variam com a distância do centro do cordão, podendo ser trativas em algumas regiões e compressivas em outras. As figuras 2(a) e (b) mostram respectivamente, a distribuição típica de tensões residuais longitudinais e transversais nas direções longitudinal e transversal ao cordão de solda em uma união de topo [Masubuchi/1980].

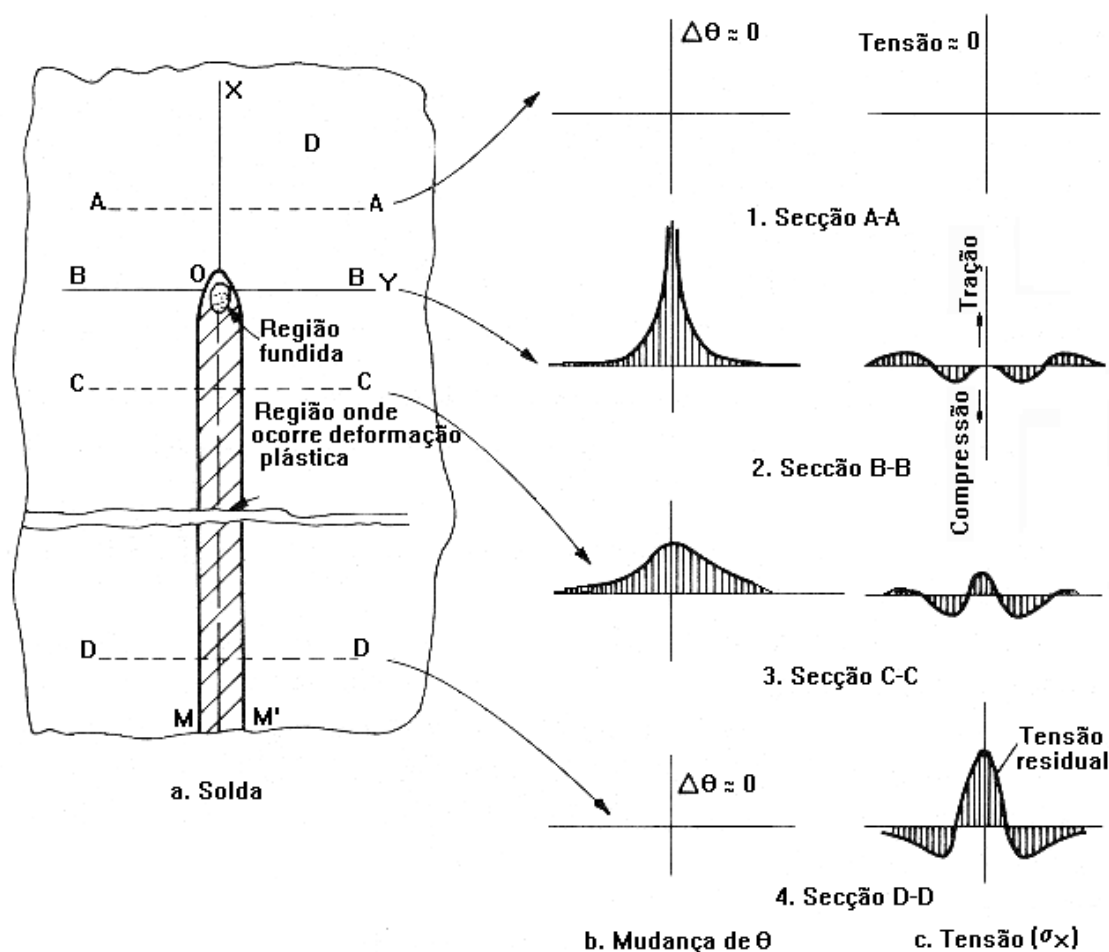


Fig. 1. Distribuições transversais de temperaturas e tensões residuais em uma deposição de material de solda.

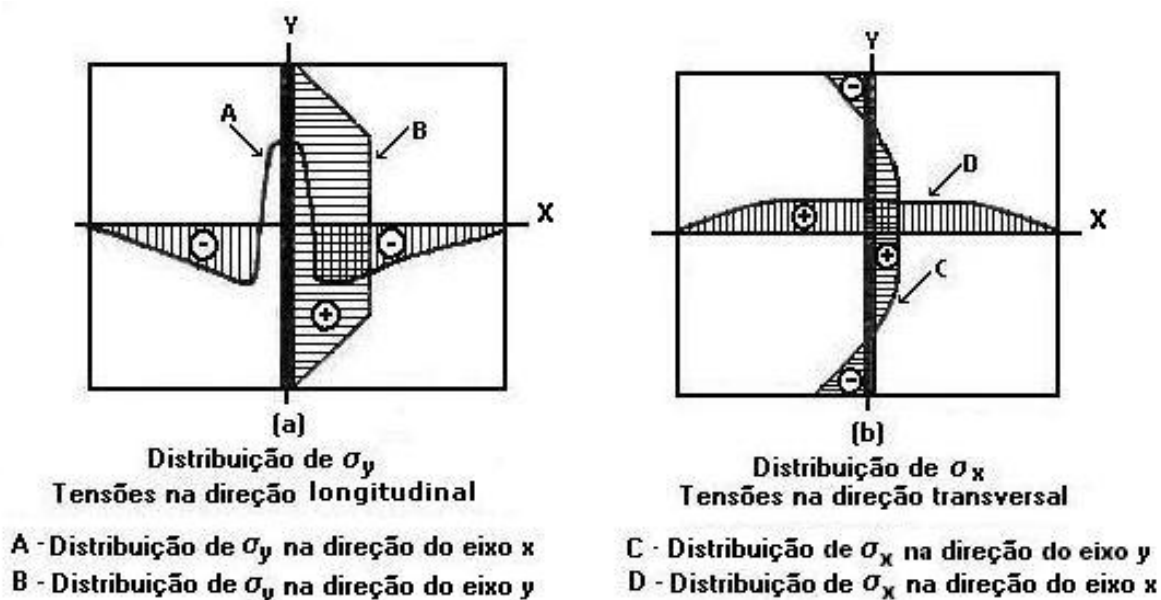


Fig. 2. Distribuição típica de tensões residuais em uma união de topo.

De acordo com a abordagem de Silveira e Barros [1983], as principais fontes de tensões residuais em uma junta soldada são:

**(a) Contração durante o resfriamento de regiões diferentemente aquecidas e plastificadas durante a soldagem.**

Esta é a principal fonte de tensão residual. Durante a realização da soldagem o aquecimento desigual da peça provoca tensões de compressão em alguns locais e tensões de tração em outros, devido às dilatações térmicas. O nível de tensões residuais depende do grau de restrição da estrutura na direção considerada. Se as tensões de contração atuam em duas ou três direções, dependendo da forma e dimensões da peça, as possibilidades de plastificação diminuem e as tensões residuais de contração podem atingir valores superiores ao limite de escoamento, determinado pelo ensaio convencional uniaxial de tração. Na maioria dos casos a restrição é total



na direção longitudinal do cordão de solda. Verificações experimentais confirmam que nesta direção as tensões são muito próximas do limite de escoamento.

A figura 3 mostra esquematicamente a distribuição de temperatura na chapa, transversalmente à solda. Mostra também que para a região aquecida acima de  $\theta_1$  (temperatura de início da deformação plástica), ocorre tensões residuais trativas. Podemos observar pela figura 4 que as tensões trativas podem atingir valores da ordem da tensão de escoamento do material no centro do cordão. Esta figura mostra também a distribuição de tensões residuais longitudinais e transversais ao cordão de solda.

#### **(b) Resfriamento mais rápido na superfície.**

O resfriamento de uma chapa soldada não é homogêneo ao longo de sua espessura. A superfície se resfria mais rapidamente que o seu interior, mesmo que o resfriamento seja ao ar, naturalmente. Assim, além do gradiente de temperatura ao longo da largura e do comprimento da chapa soldada, haverá também um gradiente ao longo da espessura da solda. Este gradiente de temperatura irá ocasionar deformação plástica localizada e, conseqüentemente, tensões residuais. No caso de chapas espessas este gradiente de temperatura é bastante elevado resultando em maiores tensões residuais. Considerando o resfriamento superficial mais rápido como única fonte de tensão residual atuante, irá se obter uma distribuição de tensões residuais de compressão na superfície, em equilíbrio com tensões residuais de tração na região interna do cordão.

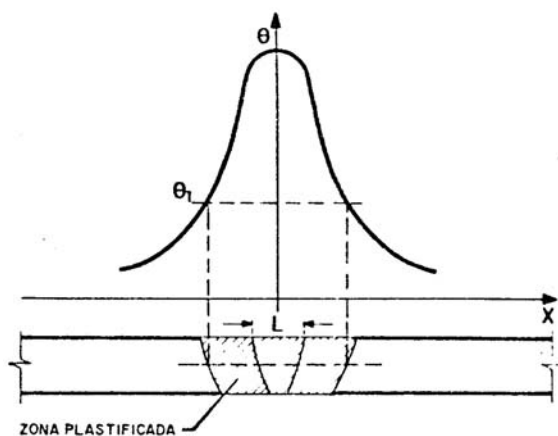


Fig. 3. Distribuição de temperatura e zona plastificada de uma chapa soldada.

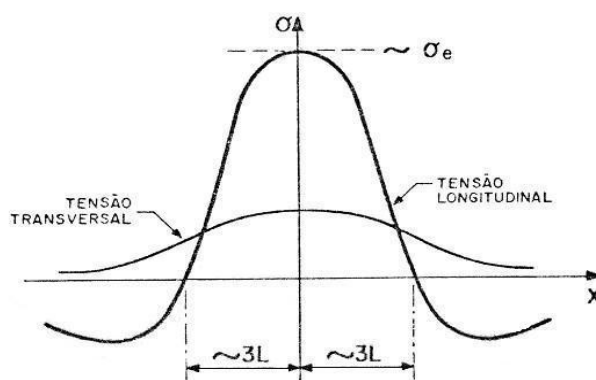


Fig. 4. Distribuição de tensões longitudinais e transversais transversalmente a uma chapa soldada.

### (c) Transformação de fase.

A transformação de fase da austenita para ferrita, bainita ou martensita ocorre com aumento de volume. Assim, em uma junta soldada, o material da zona fundida e da zona termicamente afetada que sofrem uma transformação de fase tende a se expandir, porém será impedido pelo restante do material mais frio e não transformado. Assim é explicada a geração de

tensões de compressão na região transformada e tensões de tração na região não transformada, durante o resfriamento.

Na prática, estas três fontes principais de tensões residuais explicadas acima, que ocorrem durante a soldagem, não são independentes. Elas se superpõem gerando uma distribuição de tensões bastante complexa, conforme pode ser visto na figura 5. Esta figura mostra a distribuição de tensões residuais transversais ( $\sigma_t$ ), ao longo de uma linha transversal ao cordão de solda, em uma chapa de aço de 6 mm de espessura, soldada por feixe eletrônico.

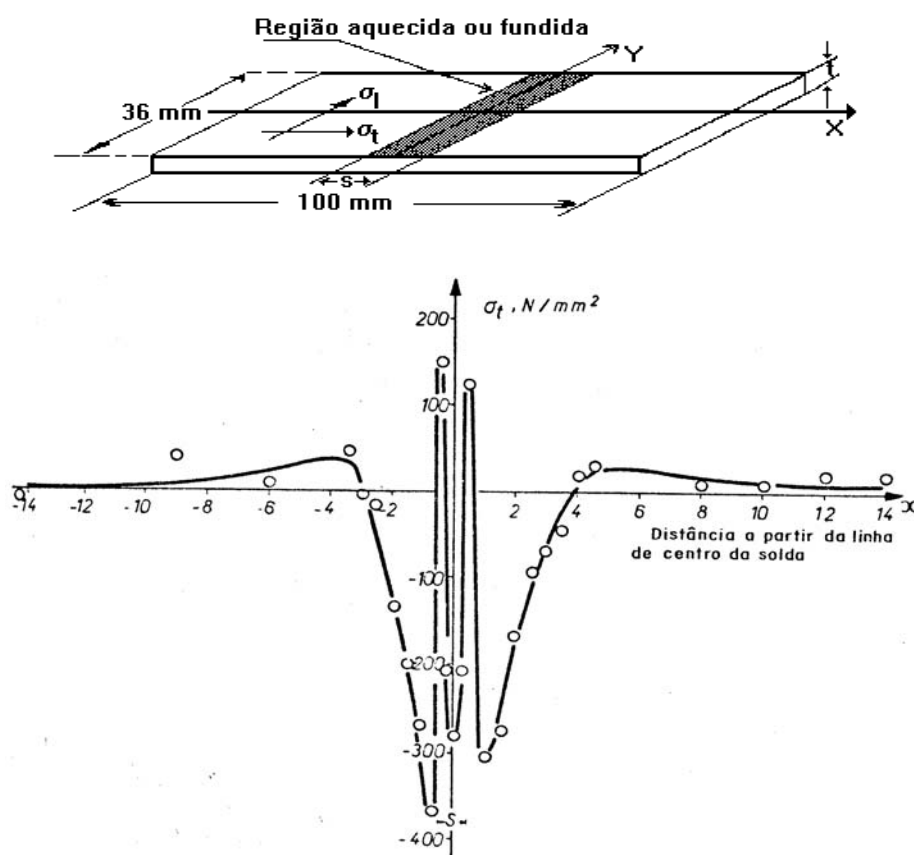


Fig. 5. Variação das tensões residuais transversais ( $\sigma_t$ ) de uma chapa soldada

[Silveira e Barros/1983].

## **2.3. Métodos para a determinação das tensões residuais nos materiais**

A grande necessidade em se determinar as tensões residuais dos materiais bem como compreender melhor os seus efeitos, proporcionou o desenvolvimento de uma série de técnicas, dispositivos e instrumentos de medição baseados em diferentes princípios. Existem técnicas destrutivas, semidestrutivas e não-destrutivas. Apesar de seu grande número ainda é necessário muita evolução dessas técnicas para torná-las de fácil utilização, garantindo bons resultados com baixas incertezas, alta repetitividade e fácil aplicabilidade na maioria dos casos e para a maioria dos materiais. [Kobayashi/1993].

Os primeiros métodos qualitativos eram baseados no alívio das tensões através de cortes, ou remoção de camadas por usinagem, ou pela medição do empenamento resultante no material. Estes recursos ainda hoje são utilizados, porém, com técnicas mais sofisticadas de medição das deformações.

Cada método possui seu domínio de aplicações bem delimitado. A seleção do mais adequado depende de vários fatores, tais como: a) natureza do campo de tensões residuais que se pretende medir, b) incerteza requerida, c) tempo disponível para a medição, d) extensão da região de interesse (superficial, sub-superficial ou em todo o volume do material).

As principais técnicas experimentais de medição de tensões residuais são:

### **2.3.1. Difração de raios-X**

Este método consiste na medida da variação do espaçamento atômico na rede cristalina do metal sob tensão através do uso de feixes estreitos e colimados de raios-X. É uma técnica bastante utilizada atualmente por ser não-destrutiva e permitir a medida em campo em tempo

real, porém, avalia apenas a camada superficial da peça, até em torno de 10  $\mu\text{m}$  de profundidade. Com o recurso da técnica de remoção de material é possível se avaliar a tensão residual em camadas mais profundas, porém neste caso o método passa a ser destrutivo. É grande a incerteza na medição, devido principalmente à influência de alguns parâmetros metalúrgicos tais como: tamanho de grão, vazios, impurezas e outros [Li, Lebrun, Ingelbert/1995].

### **2.3.2. Difração de nêutrons**

Segue o mesmo princípio do método de difração dos raios-x com a diferença fundamental de que os raios de nêutrons penetram em toda espessura do material, possibilitando a determinação de todas as três componentes principais de tensão. A incerteza deste método é praticamente a mesma da difração de raios-x. Muitas dificuldades do método tem sido estudadas e algumas resolvidas, no entanto a pouca disponibilidade de fontes de nêutrons e o custo das medições continuam limitando seu uso tanto na indústria como em laboratório [Lu/1996].

### **2.3.3. Método do furo cego com extensômetros**

O método do furo cego é bastante utilizado para se avaliar a tensão residual dos materiais devido à sua praticidade e flexibilidade. Tem como princípio a modificação do estado de tensão interna de uma peça, após a usinagem de um furo cujo objetivo é aliviar o campo de tensões. Esta modificação do estado de tensão é manifestada através de deslocamentos e deformações na superfície ao redor do furo. Os extensômetros colados ao redor deste furo é que irão medir a deformação radial causada pelo alívio de tensões. A profundidade do furo é de aproximadamente 1,2 vezes o seu diâmetro. O procedimento deste ensaio é padronizado pela



### 2.3.4. Método do furo com técnicas ópticas

Algumas das limitações apresentadas com o uso de extensômetros de resistência podem ser minimizadas pelo uso de técnicas ópticas, por exemplo, quando as peças são muito pequenas para a colagem dos extensômetros, quando se deseja medir tensões residuais localizadas, em situações onde se desejam resultados com menores incertezas, etc. Existem diversos tipos de técnicas ópticas de medição tais como: fotoelasticidade por reflexão, interferometria Moiré, holografia interferométrica, holografia eletrônica, holografia “shearing” eletrônica [Rodakoski/97].

**a) Fotoelasticidade.** Esta técnica para medir tensões residuais localizadas, parte do princípio de que muitos materiais transparentes, os quais são opticamente isotrópicos, se tornam opticamente anisotrópicos quando tensionados, isto é, ao incidir sobre ele uma onda cisalhante de luz ela se dividirá em duas ondas cisalhantes transversais. Este efeito persiste enquanto o material está sob carregamento, porém, se anula instantaneamente após a remoção da carga. Desta forma, pelo uso da lei óptica de tensão, o valor das tensões residuais aliviadas pode ser medido através da análise das franjas originadas ao redor do furo.

A determinação das tensões residuais por fotoelasticidade tem aplicação em polímeros transparentes onde diversas geometrias podem ser ensaiadas de forma direta sem realização de furo na peça. Já em componentes opacos é necessário depositar uma película de filme fotoelástico sobre a superfície do material e executar um furo [Rodakoski/97].

**b) Interferometria Moiré.** A técnica baseia-se na colagem de uma grade regular de linhas cruzadas sobre a superfície do corpo a medir, da ordem de até 1200 linhas/mm, nas direções x e y. Duas fontes de iluminação simétricas e coerentes produzem franjas horizontais devido a interferência construtiva e destrutiva. Esta grade de referência, originada da iluminação, interage com o conjunto de linhas da grade do espécime formando um padrão de franjas de Moiré. Após a instalação da grade deve ser realizado o furo para provocar o alívio de tensões na peça, o que resulta na deformação da grade. Esta região deformada é então iluminada pelos dois feixes de laser colimado. A grade deformada e a grade criada pelos feixes de laser se combinam e geram um padrão de franjas devido à componente do deslocamento, no plano, na direção perpendicular às linhas da grade sob investigação. A tensão residual desconhecida é então determinada em magnitude e direção a partir do campo de deslocamento medido. Esta técnica permite a automatização da medição, no entanto a aplicação de uma grade sobre a peça consome tempo e dependendo das condições da peça não é possível a sua instalação [Rodakoski/97].

**c) Holografia Interferométrica.** Esta técnica pode ser usada para determinar com elevada sensibilidade os campos de deslocamentos no plano ou fora do plano provocado pelo alívio das tensões residuais pela usinagem de um furo. A principal diferença da técnica de holografia, com relação à extensometria, está no tipo de sinal medido, ao invés da variação de resistência são analisados campos de alteração de fase da luz, mapas de franjas, originadas do deslocamento da superfície ao redor do furo. Nesta técnica a grandeza responsável pelo sinal é a luz coerente e monocromática do laser. São necessárias duas exposições de luz sobre um filme fotográfico de alta resolução para produzir um mapa de franjas com holografia interferométrica, a



primeira é feita na peça com tensões residuais e a segunda é feita após a realização de alívio das tensões pelo furo.

A principal vantagem desta técnica é sua alta sensibilidade, no entanto, sua aplicação exige pessoal muito qualificado. Outro fator importante a considerar é que não pode ser levada para campo devido à configuração ótica empregada e a sua sensibilidade às condições ambientais [Rodakoski/97].

**d) Holografia Eletrônica.** É uma técnica mais prática do que a holografia interferométrica clássica devido à substituição do processamento fotoquímico do filme de alta resolução por processamento do sinal digitalizado por uma câmera de vídeo. Se comparada com a técnica do furo com extensômetros apresenta a vantagem de exigir um tempo menor para o ensaio, já que elimina o tempo de preparação da superfície e colagem dos extensômetros. Porém, para que a visualização dos campos de deformação ao redor do furo não seja prejudicado, é importante que a superfície a ser analisada esteja bem limpa, isenta de resíduos de cavaco da furação, óleo, poeira, etc. O método do furo combinado com a holografia eletrônica viabiliza a medição de tensões residuais localizadas, isto é, regiões menores do que 5x5 mm onde o diâmetro do furo deve ser menor do que 1 mm. Isto pode ser obtido utilizando-se lentes de aproximação (macro) para a câmera de vídeo e técnica de furação adequada [Rodakoski/97].

**e) Holografia Shearing Eletrônica.** Esta técnica permite medir diretamente as deformações utilizando uma câmera de vídeo e placas de processamento de imagem onde são obtidos e processados os mapas de franjas criados na vizinhança do furo. A diferença fundamental entre a holografia eletrônica e a holografia shearing eletrônica está na informação

trazida pelos padrões de franja. Enquanto que na primeira as franjas representam deslocamentos, na segunda elas representam derivadas do deslocamento, ou seja, deformações [Rodakoski/1997].

#### **2.4. Técnica ultra-sônica para a avaliação da textura dos materiais e medição das tensões residuais**

Tradicionalmente o ultra-som é empregado como ensaio não-destrutivo para detectar, localizar e dimensionar descontinuidades. Atualmente sua aplicação vem se estendendo para outros tipos de ensaios tais como a avaliação da textura dos materiais, medida de tensões residuais, determinação do tamanho de grão, estudo de constantes elásticas, avaliação de porosidades em materiais cerâmicos e outros. Para cada aplicação faz-se uso de certos fenômenos que ocorrem quando a onda ultra-sônica atravessa o material, como o retroespalhamento da onda, que através da medida da atenuação permite definir alguns parâmetros do material. Para a medição das tensões residuais utiliza-se do fenômeno da variação da velocidade da onda ultra-sônica, que ocorre nos materiais metálicos devido à anisotropia acústica gerada pela textura e tensão residual [Bittencourt e outros/1997].

Embora a técnica ultra-sônica tenha evoluído bastante através de estudos em vários centros de pesquisas tais como, University of Kentucky /USA [Hsu/1974], Tokyo Institute of Technology /Japan [Kobayashi e outros/1992], University of Technology of Campiègne /France [Tanala e outros/1995], Institute of Fundamental Technological Research /Poland [Szczelazek/1992], Structural Research Laboratory /Denmark [Bach/1979], The University of Warwick /England [Crecraft/1967], Indira Gandhi Centre for Atomic Research /India [Raj e outros/1997], Instituto de Energia Nuclear/Brasil [Bittencourt e outros/1997], ela ainda apresenta

dificuldades quando aplicada para a medição de tensões residuais dos materiais. Primeiramente, a diferença entre as velocidades das duas componentes da onda cisalhante induzida pela tensão é muito pequena, da ordem de 0,5 % ou menos. Sendo assim, técnicas bastante precisas e sensíveis são necessárias. Segundo, como outros fatores além da tensão podem causar a birrefringência acústica, tal como a orientação preferencial dos grãos, é necessário separar os seus efeitos daqueles da tensão [Hsu/1973].

#### **2.4.1. Velocidade das ondas ultra-sônicas**

Como os estudos realizados neste trabalho se baseiam na variação da velocidade da onda ultra-sônica, apresenta-se um breve resumo sobre este tipo de onda.

As ondas ultra-sônicas, assim como o som audível pelo ouvido humano, são ondas mecânicas e precisam de um meio para se propagar. Como sabemos, toda substância é constituída por partículas. Essas partículas de matéria, as quais estão interligadas por forças elásticas, podem se mover em relação às suas posições de equilíbrio. Quando uma partícula é impulsionada, ela começa a vibrar e passa a sua energia para as adjacentes. Desta maneira, a energia se propaga de uma partícula para as outras partículas da substância. A frequência de vibração das partículas, é que vai informar se o som gerado é audível ou ultra-som. A velocidade de propagação de cada tipo de onda ultra-sônica depende do material onde ela se propaga. É função da densidade e das constantes elásticas do meio.

Vários tipos de ondas ultra-sônicas são utilizados para a análise de materiais, sendo as mais empregadas as ondas longitudinais, as cisalhantes e as superficiais de Rayleigh.

A onda ultra-sônica longitudinal é aquela onde a movimentação das partículas do meio é paralela à direção de propagação da onda; é também conhecida como onda de compressão e se propaga nos sólidos, líquidos e gases.

A onda cisalhante, também chamada transversal, é aquela onde a movimentação das partículas do meio é perpendicular à direção de propagação da onda. A velocidade de propagação da onda transversal é aproximadamente a metade daquela da onda longitudinal, o que pode facilitar medir o tempo entre dois ecos. As ondas cisalhantes não se propagam nos gases e líquidos.

As ondas de Rayleigh são 90% ondas cisalhantes, portanto, não se propagam em líquidos. São assim chamadas porque requerem um contorno para existirem, ou seja são ondas que requerem uma superfície para se propagarem, com a movimentação das partículas ocorrendo em uma camada fina da superfície do sólido (com profundidade equivalente a um comprimento de onda). Neste tipo de onda as partículas do meio adquirem um movimento elíptico na superfície da chapa, isto é, em torno da direção de propagação da onda. A velocidade de propagação da onda superficial de Rayleigh é de cerca de 92% daquela da onda cisalhante. A teoria da elasticidade, quando aplicada a vibrações mecânicas, permite obter expressões matemáticas para a velocidade da onda ultra-sônica, quando se tem estes três tipos de ondas se propagando através de um sólido homogêneo e isotrópico, conforme apresentado a seguir.

Para ondas longitudinais:

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - \nu)}} \quad [1]$$

Para ondas cisalhantes:

$$V_c = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad [2]$$

Portanto,

$$V_c = 0,50 V_L \quad [3]$$

Para ondas superficiais:

$$V_s = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad [4]$$

Portanto,

$$V_s = 0,92 V_c \quad [5]$$

Onde,

$V_L$  = velocidade da onda longitudinal no meio

$V_c$  = velocidade da onda transversal ou cisalhante no meio

$V_s$  = velocidade da onda superficial no meio

$E$  = módulo de Young do meio

$\rho$  = densidade do meio

$\nu$  = coeficiente de Poisson do meio

$G$  = módulo de cisalhamento do meio

Através das equações acima observa-se que a velocidade das ondas ultra-sônicas é função das constantes elásticas e da densidade do meio onde estão propagando [Bittencourt/2000].

### 2.4.2. Acustoelasticidade e Birrefringência

Similarmente ao efeito da fotoelasticidade a velocidade das ondas ultra-sônicas, ao passar através de um sólido elástico tensionado, não é constante como o seria em um sólido isotrópico. A variação da velocidade da onda ultra-sônica depende do estado de tensão do material, da direção de propagação da onda em relação aos planos cristalinos e da direção de movimentação das partículas do meio pela passagem da onda. A este efeito da variação da velocidade da onda ultra-sônica ao passar através de um material elástico sob tensão chamamos “efeito acustoelástico” [Tanala e outros/1995 e Kobayashi e outros/1992]. A variação da velocidade ocorre, em função de que ao aplicar tensão em um sólido ocorre uma mudança nas distâncias interatômicas do material. A variação do tempo de percurso da onda ultra-sônica, devido à variação de tensão, é da ordem de nanosegundos ( $10^{-9}$  s), por isso as medidas devem ser extremamente precisas.

Muitos pesquisadores têm proposto que a onda transversal ultra-sônica seja usada da mesma maneira que a luz polarizada na fotoelasticidade para se medir a tensão residual dos materiais [Hsu/1974].

Uma comparação geral entre a propagação de ondas de luz e ondas ultra-sônicas em meios anisotrópicos foi relatada por Henneck e Green em 1968 conforme apud [Hsu/1974]. Eles concluíram que, enquanto existe uma analogia direta entre luz e ondas ultra-sônicas cisalhantes, uma analogia direta passo a passo nunca será alcançada para todos os fenômenos, visto que as equações do material requeridas para discutir ondas acustoelásticas são de ordem superior às aquelas requeridas para discutir ondas ópticas. Por exemplo, o termo birrefringência (ou dupla refração) rigorosamente falando não pode ser aplicado na acústica, pois, quando a onda cisalhante

incide normalmente à face de um sólido isotrópico, ela não se divide simplesmente em duas ondas, como no caso da luz. Ao invés disto ela se dividirá em três ondas, uma quase longitudinal e outras duas quase transversais. Apenas quando a onda cisalhante estiver se propagando ao longo do eixo principal de simetria de um meio anisotrópico, haverá duas ondas puras transversais, exatamente como ocorre na dupla refração óptica. Segundo Hsu [1974] no caso de anisotropia induzida pela tensão, quando se considera somente o plano de tensão e a onda acústica está se propagando perpendicularmente ao plano de tensão, a tripla refração não irá ocorrer, portanto, a birrefringência induzida pela tensão, pode ser comparada com a birrefringência óptica.

A teoria que descreve o efeito acustoelástico foi obtida por Toknoka e Iwashimizu em 1968 [apud Allen e Sayers, 1983]. Eles mostraram que as diferenças de velocidade entre as duas ondas cisalhantes principais são diretamente proporcionais à diferença entre as duas tensões principais. Portanto, na teoria, o efeito acustoelástico é exatamente análogo ao efeito fotoelástico, no caso particular em que o eixo de tensões coincide com o eixo de simetria do material.

Através da teoria linear elástica pode-se descrever o comportamento elástico dos materiais isotrópicos, utilizando-se das constantes elásticas de segunda ordem  $\lambda$  e  $\mu$ . Estas constantes são conhecidas como constantes de Lamé de um meio isotrópico. Porém, para um estudo teórico do efeito acustoelástico dos materiais, com relação à variação da velocidade da onda ultra-sônica em um material tensionado, Murnaghan desenvolveu uma teoria para a energia de deformação elástica, introduzindo constantes elásticas de terceira ordem,  $l$ ,  $m$  e  $n$ . Estas constantes foram chamadas de constantes de Murnaghan. Mais tarde Hughes e Kelly/[1953], tendo como base a teoria de Murnaghan, desenvolveram as relações básicas entre a velocidade da onda ultra-sônica

e a deformação que surge quando uma tensão uniaxial é aplicada em um material isotrópico. Um estudo detalhado destas relações pode ser encontrado em Sayers e Allen [1983].

A figura 7 faz a representação de uma carga uniaxial sendo aplicada em um corpo inicialmente isotrópico, mostrando através de um sistema de coordenadas ortogonais as direções, bem como as velocidades de propagação da onda [Bray e Stanley/1997].

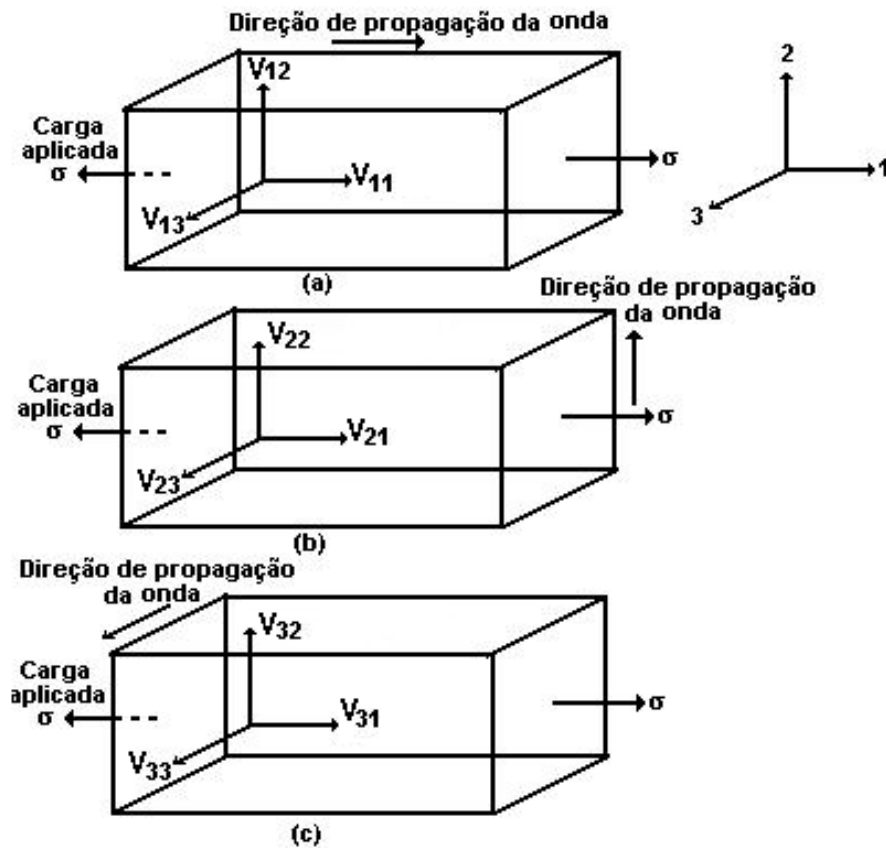


Fig. 7. Velocidade das ondas ultra-sônicas e direção da tensão em um sistema de coordenadas ortogonal [Bray e Stanley/1997].

Bray e Stanley [1997] mostraram que a velocidade de uma onda ultra-sônica propagando na direção 1 (como da fig. 7) com os deslocamentos das partículas nas direções 1, 2 e 3, de um



corpo inicialmente isotrópico, sujeito a um campo de tensão triaxial homogêneo, fica conforme as equações abaixo:

$$\rho_0 V_{11}^2 = \lambda + 2\mu + (2l + \lambda)\theta + (4m + 4\lambda + 10\mu)\alpha_1 \quad [6]$$

$$\rho_0 V_{12}^2 = \mu + (\lambda + m)\theta + 4\mu\alpha_1 + 2\mu\alpha_2 - (1/2)n\alpha_3 \quad [7]$$

$$\rho_0 V_{13}^2 = \mu + (\lambda + m)\theta + 4\mu\alpha_1 + 2\mu\alpha_3 - (1/2)n\alpha_2 \quad [8]$$

Nas equações os símbolos representam:

$V_{11} \rightarrow$  velocidade da onda longitudinal propagando-se na direção 1, com o deslocamento das partículas também na direção 1.

$V_{12} \rightarrow$  velocidade da onda cisalhante propagando-se na direção 1 com o deslocamento das partículas na direção 2.

$V_{13} \rightarrow$  velocidade da onda cisalhante propagando-se na direção 1 com o deslocamento das partículas na direção 3.

$\rho_0 \rightarrow$  densidade inicial do material.

$\lambda$  e  $\mu \rightarrow$  constantes elásticas de segunda ordem (constantes de Lamé).

$l, m$  e  $n \rightarrow$  constantes elásticas de terceira ordem (constantes de Murnaghan).

$\alpha_1, \alpha_2$  e  $\alpha_3 \rightarrow$  componentes das deformações principais nas direções 1, 2 e 3.

$\theta \rightarrow$  igual a  $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$ .

Para o caso de cargas uniaxiais, existem cinco modos diferentes de propagação das ondas ultra-sônicas. Estas velocidades podem ser determinadas através das equações acima.

Para o estado uniaxial de tensões, considerando-se a tensão atuando na direção 1, as componentes principais da deformação valem:

$$\alpha_1 = \varepsilon$$

$$\alpha_2 = \alpha_3 = -\nu\varepsilon$$

Onde  $\varepsilon$  é a deformação e  $\nu$  é o coeficiente de Poisson do material. Assim determina-se as equações relacionando a velocidade de ondas longitudinais e cisalhantes à deformação.

Ondas longitudinal e cisalhante propagando-se na direção da aplicação da carga uniaxial:

$$\rho_0 V_{11}^2 = \lambda + 2\mu + [4(\lambda + 2\mu) + 2(\mu + 2m) + \nu\mu(1 + 2l/\lambda)] \varepsilon \quad [9]$$

$$\rho_0 V_{12}^2 = \rho_0 V_{13}^2 = \mu + [4\mu + \nu(n/2) + m(1 - 2\nu)] \varepsilon \quad [10]$$

Ondas longitudinal e cisalhante propagando-se perpendicularmente à direção de aplicação da carga para uma carga uniaxial:

$$\rho_0 V_{22}^2 = \lambda + 2\mu + [2l(1 - 2\nu) - 4\nu(m + \lambda + 2\mu)] \varepsilon \quad [11]$$

$$\rho_0 V_{21}^2 = \rho_0 V_{31}^2 = \mu + [(\lambda + 2\mu + m)(1 - 2\nu) + n\nu/2] \varepsilon \quad [12]$$

$$\rho_0 V_{23}^2 = \rho_0 V_{32}^2 = \mu + [(\lambda + m)(1 - 2\nu) - 6\nu\mu - n/2] \varepsilon \quad [13]$$

Onde,  $V_{22}$  é a velocidade da onda longitudinal propagando-se na direção 2 e as partículas do sólido vibrando na direção 2.  $V_{21}$  e  $V_{23}$  são as velocidades das ondas cisalhantes propagando-se na direção 2 e as partículas do sólido vibrando na direção 1 e 3, respectivamente.

Considerando-se as relações elásticas entre tensão e deformação é possível estabelecer equações que relacionam a velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas, longitudinal e cisalhante com as tensões existentes no material.

Para a onda propagando-se paralelamente à direção da carga aplicada tem-se:

$$\rho V_L^2 = \lambda + 2\mu + (\sigma/3k)[2l + \lambda + (\lambda + \mu)(4m + 4\lambda + 10\mu)/\mu] \quad [14]$$

$$\rho V_C^2 = \mu + (\sigma/3k)[m + (\lambda n/4\mu) + 4\lambda + 4\mu] \quad [15]$$

Para a onda propagando-se perpendicularmente à direção da carga aplicada tem-se:

$$\rho V_L^2 = \lambda + 2\mu + (\sigma/3k)[2l - (2\lambda/\mu)(m + \lambda + 2\mu)] \quad [16]$$

$$\rho V_{CI}^2 = \mu + (\sigma/3k)[m + (\lambda n/4\mu) + \lambda + 2\mu] \quad [17]$$

$$\rho V_{Ct}^2 = \mu + (\sigma/3k)[m - (\lambda + \mu) + n/2\mu - 2\lambda] \quad [18]$$

Onde  $\sigma$  é a tensão uniaxial (positiva para tensão compressiva e negativa para tensão trativa); o subscrito **C** refere-se à onda cisalhante e **L** à onda longitudinal. O subscrito **CI** corresponde à onda cisalhante com polarização paralela à direção da tensão e o subscrito **Ct** corresponde à onda cisalhante com polarização perpendicular à direção da tensão,  $\rho$  é a densidade do meio onde a onda está se propagando, livre de tensões; **K** é o módulo volumétrico e vale:

$$K = \lambda + 2\mu/3 \quad [19]$$

Para as equações 14 e 16, o primeiro fator do lado direito  $(\lambda + 2\mu)$  descreve a velocidade da onda ultra-sônica longitudinal propagando-se em um meio livre de tensões. Para as equações 15, 17 e 18, referentes às ondas cisalhantes, este fator é  $(\mu)$ .

Para se determinar as tensões a partir destas equações, é necessário que se conheça a velocidade da onda ultra-sônica com bastante exatidão no material antes de estar tensionado. Isto é difícil, pois as variações microestruturais do material têm influência sobre a velocidade da onda na mesma ordem de grandeza que a tensão. Uma outra dificuldade está em que as medidas requerem o conhecimento do caminho percorrido pela onda, assim como as medidas do tempo percorrido, com resolução ao menos uma ordem de grandeza maior que o efeito da tensão observado, o que na prática muitas vezes não é possível.

As equações desenvolvidas por Hughes e Kelly (mostradas acima) podem ser combinadas de maneira a facilitar sua utilização na prática. Elas podem ser representadas em termos da variação da velocidade da onda ultra-sônica em relação à tensão. De maneira genérica, segundo Schneider e outros [1985] apud Lu [1996], as equações ficam da seguinte forma:

Para ondas longitudinais,

$$\frac{V_{ii} - V_i^0}{V_i^0} = k_1 \sigma_i + k_2 (\sigma_j + \sigma_k) \quad [20]$$

Para ondas cisalhantes,

$$\frac{V_{ij} - V_c^0}{V_c^0} = k_3 \sigma_i + k_4 \sigma_j + k_5 \sigma_k \quad [21]$$

Onde  $V_l^0$  e  $V_c^0$  são as velocidades das ondas longitudinais e cisalhantes respectivamente, propagando-se no material sem tensão,  $V_{ij}$  é a velocidade de uma onda propagando-se na direção  $i$  e polarizada na direção  $j$ ;  $\sigma_i$ ,  $\sigma_j$  e  $\sigma_k$  são as tensões principais nas respectivas direções e  $k_1$ ,  $k_5$  são chamadas constantes acustoelástica normalizadas e que são combinações das constantes elásticas. Cada constante acustoelástica corresponde a uma relação entre a direção de propagação da onda e a direção de polarização das partículas em relação à tensão, e são obtidas a partir da variação relativa da velocidade das ondas em um material tensionado uniaxialmente, assumindo variações muito pequenas, a partir das cinco equações acima (eq. 11 a 15), cada equação gerando uma constante.

Uma maneira de amenizar alguns problemas referentes à aplicação direta das relações entre a velocidade da onda ultra-sônica e a tensão no material, é fazendo uso do fenômeno da birrefringência.

Na aplicação do ultra-som para a medida de tensões utiliza-se o termo "técnica da birrefringência" ao se empregar ondas cisalhantes com incidência normal e denomina-se birrefringência acústica à diferença fracional da velocidade ou do tempo de transito da onda ultra-sônica, em relação a duas ondas polarizadas ortogonalmente [Bittencourt /2000].

A aplicação da onda ultra-sônica cisalhante para a medida da tensão volumétrica é usada freqüentemente porque permite eliminar a limitação que ocorre, na medida de velocidade, em função da espessura do material. Além do que, em relação à onda longitudinal, a onda cisalhante é mais sensível para essa aplicação, o que será visto adiante pela observação das constantes acustoelásticas do material, o que a torna mais recomendada para a análise de tensões em chapas no estado biaxial de tensão [Allen/1985].

Na técnica da birrefringência, a onda propaga-se perpendicularmente à superfície do material, isto é, na direção da espessura, podendo a direção de polarização ser alinhada ou perpendicular à direção de aplicação da carga ou direção de laminação do material. Em um material isotrópico, isto é, sem efeito da textura e da tensão, o tempo que a onda leva para percorrer esta espessura é o mesmo para as duas direções de polarização. Se este material estiver tensionado isto não ocorre, sendo assim a equação genérica da onda cisalhante, mostrada anteriormente, equação 21, combinada para as duas direções de polarização passa a ser:

$$\mathbf{B} = \frac{(V_{31} - V_{32})}{V_{31}^0} = (\mathbf{K}_4 - \mathbf{K}_5)(\sigma_1 - \sigma_2) \quad [22]$$

Onde,  $\mathbf{B}$  é a birrefringência,  $\mathbf{k}_4$  e  $\mathbf{k}_5$  são as constantes acustoelásticas para o material em questão,  $V_{31}^0$  é a velocidade da onda na ausência de tensões e  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  são as tensões principais.

É chamado de ortotrópico o material que apresenta simetria elástica com relação a três planos cristalinos. Como exemplo de material ortotrópico, ou ligeiramente ortotrópico, podemos citar o caso de chapas metálicas, pois, elas apresentam uma textura onde grande parte dos grãos estão alinhados com a direção de laminação, e paralelos com relação à sua superfície. Estas direções, paralelas e ortogonais com relação ao plano da chapa, são duas direções de simetria ortotrópica. Estudos comprovaram que esta simetria ortotrópica existe em chapas de aço e alumínio. Portanto, para estes materiais, a direção de laminação e a ortogonal a esta são chamadas de direções de simetria do material. Pode ocorrer também que os eixos das tensões principais não estejam totalmente alinhados com o eixo de simetria do material, neste caso ocorre um desvio da direção de polarização, sendo assim estas direções de polarização não estariam

coincidindo com as direções principais de carregamento. Quando isto ocorre, Iwashimizu [1979] propõe equações que levam em conta este desvio na determinação da birrefringência do material. Considerando-se que o ângulo formado entre a direção de simetria do material e a direção de polarização seja  $\Phi$ , tem-se:

$$\tan 2 \Phi = 2m \sigma_{XY} / B_0 + m (\sigma_{XX} - \sigma_{YY}) \quad [23]$$

Onde,  $B_0$  é a birrefringência inicial (induzida apenas pela textura, isto é, sem carregamento),  $m$  é a constante acustoelástica do material,  $\sigma_{XX}$ ,  $\sigma_{YY}$  e  $\sigma_{XY}$  são as tensões no plano de simetria do material.

Combinando-se a equação acima com a equação da birrefringência no estado plano de tensões :

$$B^2 = [ B_0 + m(\sigma_{XX} - \sigma_{YY}) ]^2 + (2m\sigma_{XY})^2 \quad [24]$$

Tem-se:

$$\sigma_{XY} = B \sin 2\Phi / 2m \quad [25]$$

Conseqüentemente, uma determinação absoluta de  $\sigma_{XY}$  pode ser feita localizando o eixo acústico e medindo a birrefringência ( $B$ ). A birrefringência é calculada através de:

$$B = \frac{t_L - t_t}{\frac{t_L + t_t}{2}} \quad [26]$$

Onde  $t_L$  é o tempo de percurso da onda ultra-sônica polarizada ao longo do eixo acústico "rápido" e  $t_t$  é o tempo de percurso da onda polarizada ao longo do eixo acústico "lento".

Quando a tensão cisalhante for igual a zero, isto é,  $\sigma_{XY} = 0$ , então  $\Phi = 0$ , significa que as direções das tensões principais coincidem com a direção de simetria ortotrópica do material. Sendo assim, a equação (24) fica reduzida a:

$$B = B_0 + m (\sigma_1 - \sigma_2) \quad [27]$$

Onde:

$B$  é a birrefringência do material sob tensão.

$B_0$  é a birrefringência inicial do material ( sem tensão).

$m$  é o coeficiente acustoelástico do material.

$\sigma_1$  e  $\sigma_2$  são as tensões principais atuando no material.

Através de medidas experimentais realizadas em 3 (três) amostras de aço perlítico usados em trilhos de estrada de ferro, Bray e Stanley [1997] mostraram relativas mudanças na velocidade da onda como uma função da tensão axial para os 5 (cinco) tipos de onda mostrado nas equações 9; 10; 11; 12 e 13. Estas mudanças podem ser vistas na fig. 8. Como previsto pela teoria, a variação na velocidade da onda é uma função linear da deformação, e a maior mudança relativa



da velocidade está associada com ondas longitudinais se propagando paralelamente à direção da carga aplicada ( $V_{L1}$ ). A menor mudança relativa está associada com ondas transversais propagando-se perpendicularmente à direção de carregamento e polarizada perpendicular ao eixo de carregamento ( $V_{23}$ ).

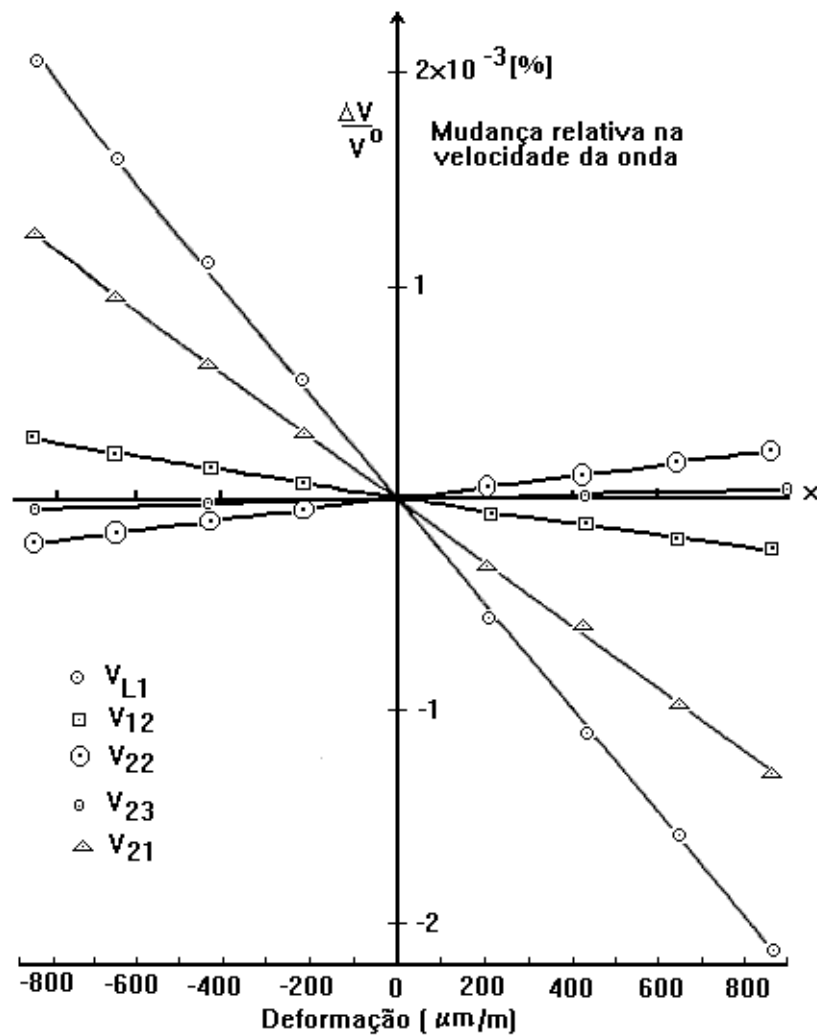


Fig 8. Variação da velocidade da onda em função da deformação do material tensionado

[Bray e Stanley/1997].

### 2.4.3. Técnicas de medições da velocidade da onda ultra-sônica

A maioria das técnicas ultra-sônicas utilizadas para medidas das tensões baseiam-se no fenômeno de que a presença de tensões em um material afeta a velocidade da onda ultra-sônica, conhecido como efeito acustoelástico. Como a variação da velocidade devido à aplicação de tensão é muito pequena, na situação mais crítica alguns trabalhos citam entre  $10^{-3}$  a  $10^{-4}$  %, medidas de velocidade, ou de tempo de percurso da onda, extremamente precisas são necessárias. Além disso, a anisotropia causada pela textura na maioria dos materiais faz com que a velocidade da onda seja alterada na mesma ordem de grandeza que as tensões. Sendo assim, foi necessário o desenvolvimento de técnicas de medidas que levassem em conta este efeito [Pritchard/1987].

As equações básicas relacionando a velocidade da onda-ultra-sônica com a deformação que surge no material quando este está tensionado foram determinadas por Hughes e Kelly [1958].

Algumas técnicas de medidas do tempo de percurso, ou seja, da velocidade da onda ultra-sônica foram desenvolvidas por pesquisadores para a análise de tensões. Uma das primeiras técnicas experimentais usando-se o ultra-som como forma de medida de tensão foi empregada por Benson e Raelson [1959]. Eles aplicaram a técnica da interferência. Consistia em determinar a variação de fase entre as ondas birrefratadas, pois esta variação de fase é diretamente proporcional à variação da velocidade da onda ultra-sônica.

Creecraft [1967] utilizou uma técnica desenvolvida por alguns pesquisadores denominada "sing around" que consistia em utilizar dois transdutores de ondas ultra-sônicas, um como emissor, de um lado da amostra, e outro como receptor, do outro lado. O sinal elétrico recebido pelo transdutor receptor aciona novamente o transmissor, de forma a reciclar o pulso de som. O

pulso de energia sonora recicla o sistema a uma frequência de repetição de pulso determinada pelo tempo de trânsito da onda ultra-sônica. Esta técnica apresenta o inconveniente da necessidade de acesso ao outro lado da peça em inspeção, além de mostrar elevada sensibilidade a variações de temperatura.

Outra técnica denominada "pulse-echo-overlap," foi utilizada por Hsu [1974] e Hirao [1992]. Esta técnica usa apenas um transdutor que serve como emissor e receptor de ondas. Dois ecos de um trem de ondas são mostrados no osciloscópio. A varredura horizontal do osciloscópio e estes dois pulsos são trigados por um sinal senoidal de onda contínua cujo período é aproximadamente igual ao tempo de trânsito entre os dois ecos. Um ajuste apropriado da frequência da onda contínua permite o alinhamento deste sinal com os dois ecos (sobreposição) de forma que o período da onda contínua corresponda exatamente ao tempo de trânsito entre os dois ecos. Esta técnica tem a vantagem de não necessitar acesso aos dois lados da peça.

#### **2.4.4. A textura dos materiais**

Os materiais policristalinos podem ser considerados isotrópicos quando seus grãos estão distribuídos aleatoriamente. Entretanto, se estes grãos assumem uma determinada orientação preferencial, isto gera uma certa anisotropia nas propriedades físicas/mecânicas do material. Durante os processos de fabricação os materiais são trabalhados mecanicamente, resultando na presença de uma orientação preferencial cristalina (textura), tornando-os anisotrópicos com relação ao comportamento acústico, assim como quando ele é submetido a uma tensão.

Muitos métodos foram desenvolvidos como maneiras de separar os efeitos da textura dos da tensão. Um destes métodos foi proposto por Allen e Sayers [1984], combinando a medida do

tempo de trânsito de uma onda longitudinal com a medida do tempo de duas ondas cisalhantes ortogonalmente polarizadas. Basearam-se no argumento demonstrado por eles de que, a soma dos quadrados das velocidades dos três modos de onda, incidindo perpendicularmente e tomados em qualquer superfície, num material de estrutura cúbica, é uma constante independente da textura.

Fisher [1987] desenvolveu um método que consistia em medir a velocidade da onda na extremidade da chapa laminada, pois, nestes locais não existe tensão residual, sendo assim a velocidade da onda estaria sendo afetada apenas pela textura. Esta medida seria utilizada como referência ao se medir a parte da chapa laminada com tensão. Este método foi empregado também por outros pesquisadores afirma Fisher [1987] por apresentar a particularidade de que, o material ensaiado inicialmente estaria representando exatamente a mesma microestrutura do material ao qual se desejava medir as tensões.

Através do uso de ondas cisalhantes polarizadas horizontalmente, Pritchard [1987] mostrou também que é possível separar o efeito da textura daquele da tensão. Para isso mediu a velocidade da onda superficial horizontalmente polarizada em função do ângulo entre a direção de propagação da onda e a direção de laminação de uma chapa de alumínio. Observa-se na fig.9 que para ângulos intermediários entre as direções de laminação e a ortogonal a esta, a velocidade é afetada pela textura, o grau de variação depende da quantidade e tipo de textura do material, porém a  $90^\circ$  a velocidade voltará ao seu valor original como a  $0^\circ$ , para o material livre de tensões. Entretanto, quando o material está sob tensão não ocorre esta simetria.

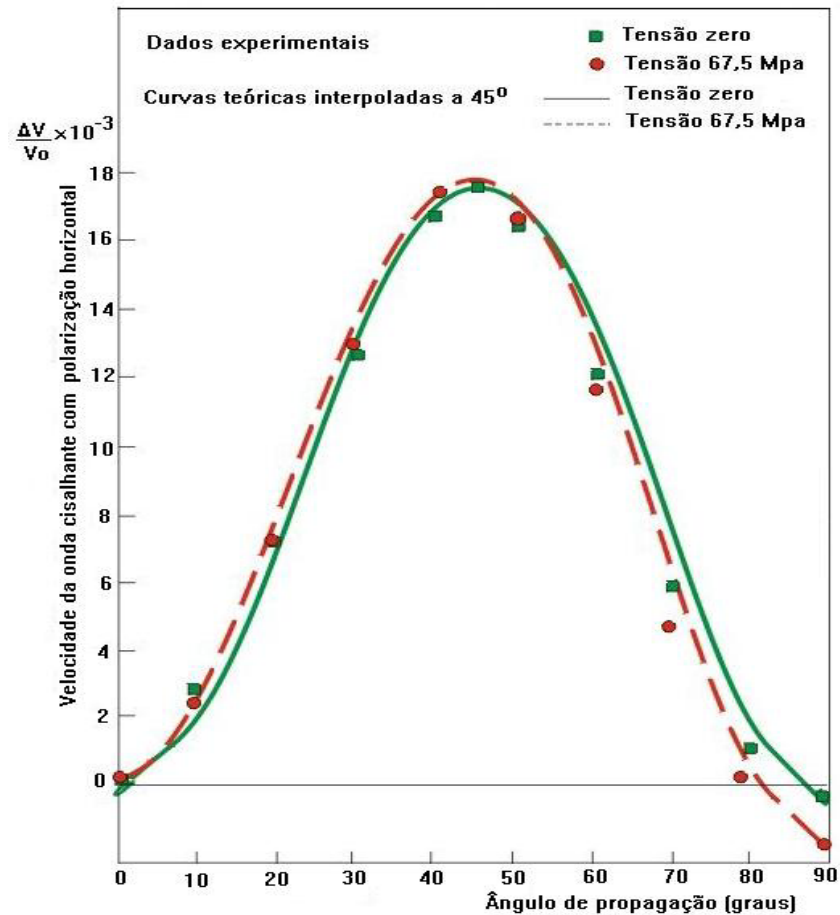


Fig. 9. Efeito da textura e tensão na velocidade das ondas cisalhantes polarizadas horizontalmente [Pritchard/1987].

Bittencourt e outros [1997] aplicaram a técnica da birrefringência para determinar a direção de laminação de chapas de aço e alumínio com um transdutor de ondas cisalhantes de incidência normal (perpendicular à face da chapa). Para o teste o transdutor foi posicionado em vários pontos da superfície da chapa de maneira que o ângulo formado entre a direção de polarização da onda e direção de laminação do material, ficasse em 0°, 45° e 90°. Para cada posição mediu-se a velocidade da onda, ou seja, o tempo que a onda levou para percorrer a espessura da chapa. Eles concluíram que dependendo do tipo de material que está sendo

analisado o tempo de percurso é maior ou menor, quando a direção de polarização está alinhada com a direção de laminação, ocorrendo o oposto quando está perpendicular à esta. Para o aço a menor velocidade ocorre quando a direção de polarização está perpendicular à direção de laminação, para o alumínio o comportamento é o oposto. Sendo assim, a direção de laminação é aquela em que o sinal ultra-sônico chega adiantado ou atrasado em relação aos das outras posições.

A fig.10 mostra um trecho do sinal ultra-sônico que corresponde ao quarto eco referente à espessura de uma chapa de aço. A curva vermelha corresponde ao sinal da onda ultra-sônica propagando-se perpendicularmente à espessura da chapa, com o transdutor posicionado de maneira que a DP estivesse alinhada com a DL da chapa. A curva preta corresponde ao sinal da onda com o transdutor posicionado de maneira que a DP estivesse perpendicular à DL. Observa-se que a velocidade da onda quando a DP está alinhada com a DL é maior do que quando a DP está perpendicular à DL, pois o sinal chegou adiantado.

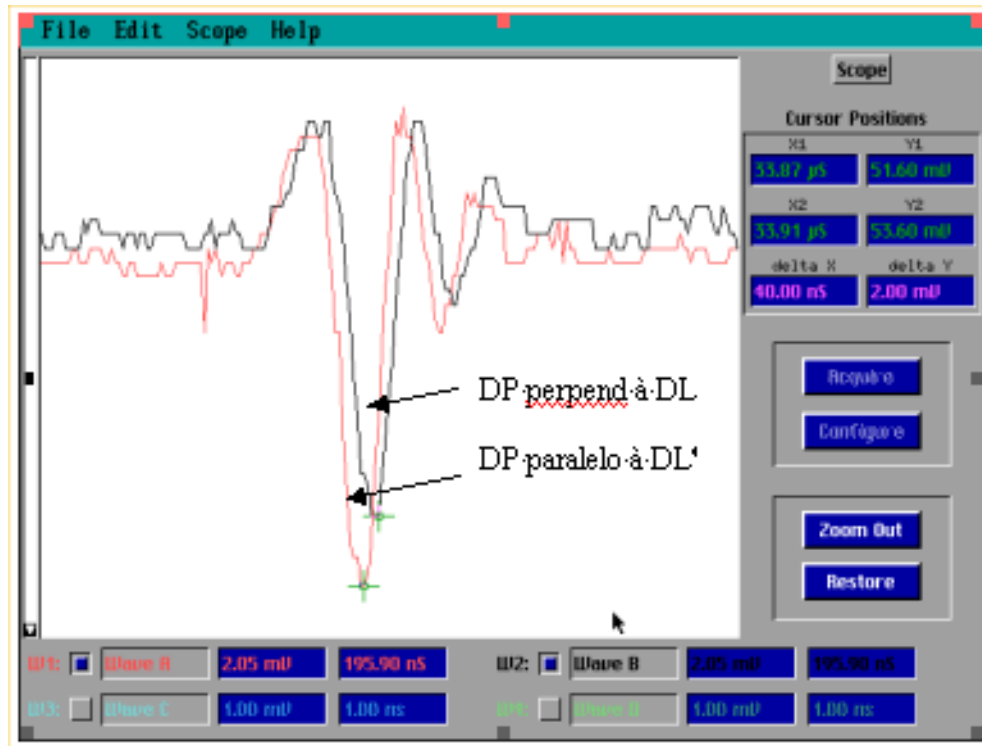


Fig. 10. Sinal ultra-sônico mostrando a variação da velocidade da onda conforme a DP em relação à DL de uma chapa de aço [Bittencourt/IEN].

#### 2.4.5. Determinação por ultra-som de tensões residuais em juntas soldadas

O método de medida das tensões residuais em chapas soldadas utilizando a birrefringência acústica tem sido estudado tanto para os aços comum ao carbono, como para os aços inoxidáveis e alumínio.

O gráfico da figura 11 mostra a distribuição de tensão em uma chapa de liga Al- Mg soldada. Observa-se que em alguns trechos as medidas não foram plotadas por serem inconsistentes. Isto ocorre no centro do cordão e a mais ou menos 120 mm, local onde foi soldado um reforço na face oposta da chapa, para restringir a deformação. Na solda e na zona afetada pelo

calor não foram feitas medidas com ultra-som devido às mudanças microestruturais, as quais afetam fortemente a velocidade da onda. Para a componente de tensão longitudinal ( $\sigma_L$ ) transversalmente ao cordão de solda, houve boa coincidência entre ambas técnicas. No caso da componente transversal ( $\sigma_T$ ) transversalmente ao cordão de solda, não ocorreu o mesmo. Para  $\sigma_T$ , pode-se assumir uma distribuição não homogênea na espessura da chapa [Tanala, Bourse e outros/1995].

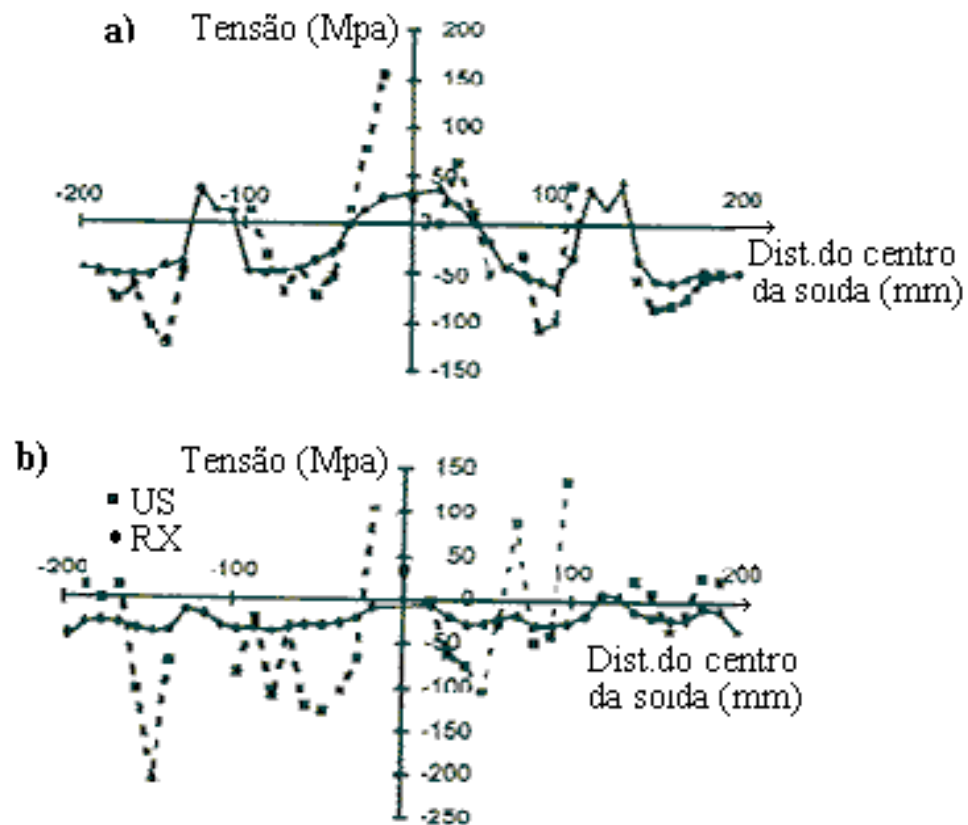


Fig.11. Comparação entre as técnicas (Ultra-som x Difração raio-X) na distribuição de tensão em uma chapa soldada de Al-Mg. (a) Distribuição de ( $\sigma_L$ ). (b) Distribuição de ( $\sigma_T$ )

[Tanala, Bourse e outros/1995].



O gráfico da figura 12 mostra a distribuição de tensão em um tubo de aço inoxidável soldado. As curvas obtidas pela técnica ultra-sônica foram comparadas com a técnica de difração por raios-x. Na técnica ultra-sônica foram utilizados transdutores de ondas superficiais de Rayleigh e ondas longitudinais sub superficiais. Os transdutores apresentavam superfícies curvas para um melhor acoplamento na superfície do tubo. As medidas das tensões longitudinais ( $\sigma_L$ ) transversalmente ao cordão de solda foram feitas com transdutor de ondas superficiais de Rayleigh. As medidas de tensões transversais ( $\sigma_T$ ), transversalmente ao cordão com transdutor de ondas sub superficiais longitudinais. Para a componente de tensão ( $\sigma_L$ ) houve boa coincidência entre ambas técnicas. No caso da componente transversal ( $\sigma_T$ ) também pode-se afirmar o mesmo.

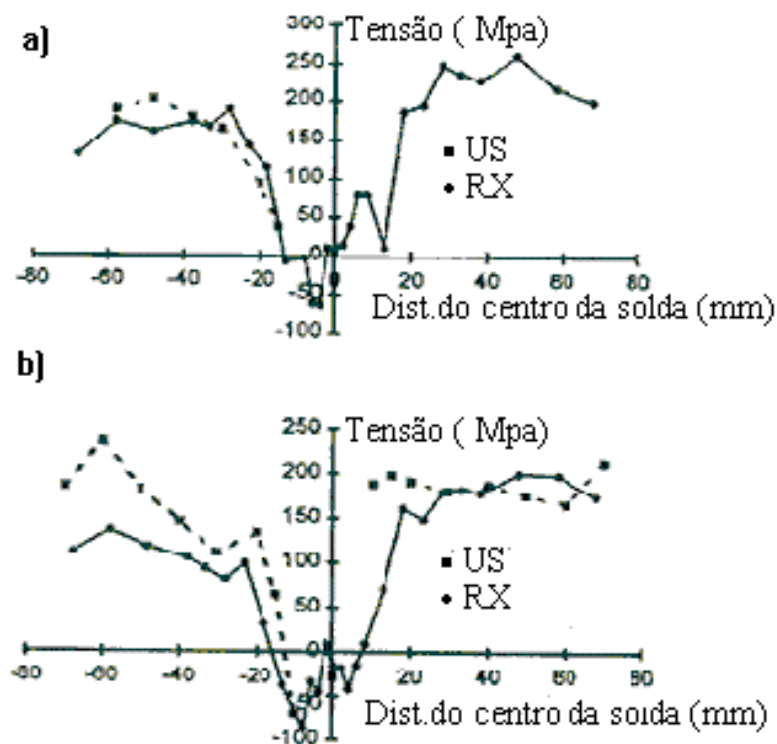


Fig.12. Comparação entre as técnicas (Ultra-som x Difração raio-X) na distribuição de tensão em um tubo de aço inoxidável soldado. (a) Distribuição de ( $\sigma_L$ ). (b) Distribuição de ( $\sigma_T$ )

[Tanala, Bourse e outros/1995].

A técnica ultra-sônica da birrefringência acústica foi utilizada por Bittencourt [2000] para examinar a distribuição de tensões originadas pela soldagem de topo de duas chapas de liga AlMg com 6mm de espessura. As chapas foram preparadas com a DL paralela ao cordão de solda. O processo de soldagem empregado foi o TIG com vareta de adição de diâmetro de 1/8" AWS ER4043 constando de apenas um passe com amperagem de 140 A. Antes da união as chapas foram fixadas por pontos de solda, sobre uma outra chapa de Al para restringir o corpo de prova de forma a gerar mais tensões internas.

A fig. 13 mostra o perfil de 3 (três) curvas de distribuição de tensão ao longo de uma linha transversal ao cordão de solda. Os valores indicados correspondem às diferenças entre as tensões principais, calculadas conforme a equação  $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{m} (\sigma_1 - \sigma_2)$ . As três curvas mostraram uma distribuição de tensões bastante uniforme. Nota-se também uma boa simetria para os dois lados da chapa, resultado este explicável, já que a solda foi executada com apenas um passe em uma junta de topo simétrica.

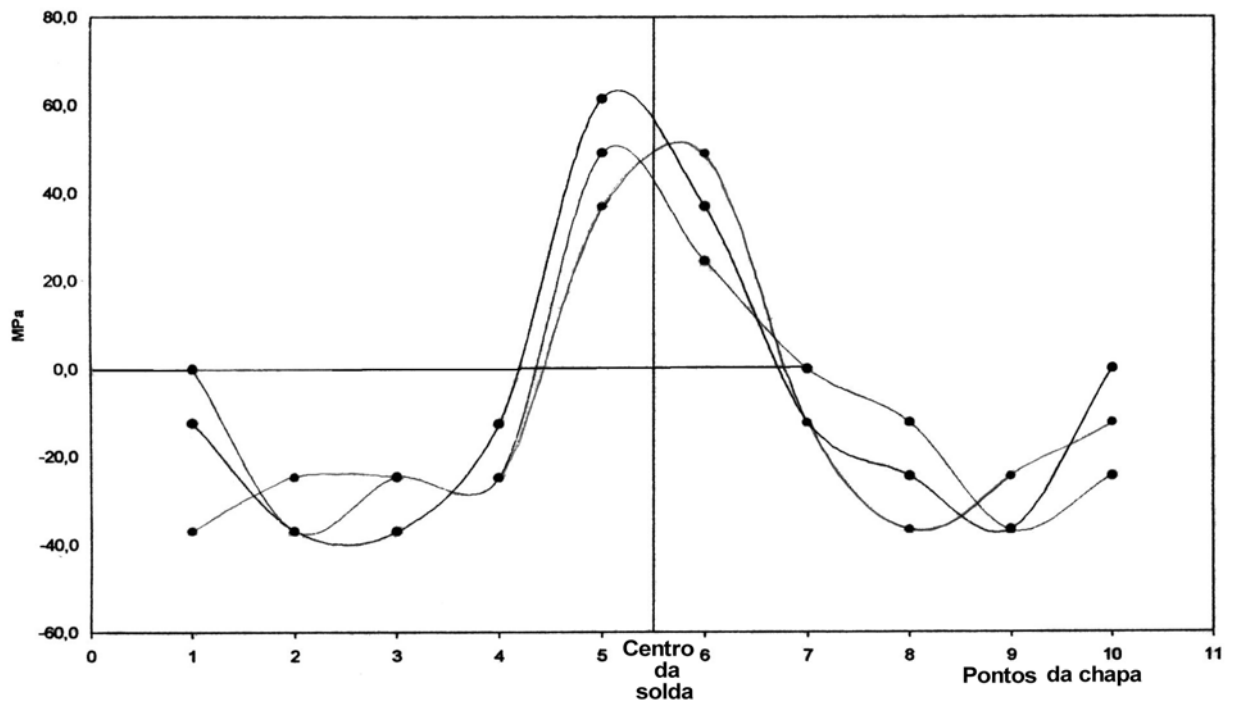


Fig. 13. Distribuição de  $(\sigma_1 - \sigma_2)$  perpendicularmente ao cordão de solda em chapas de liga AlMg [Bittencourt/2000].

### **3. Materiais e Métodos**

#### **3.1. Componentes do sistema de medições por ultra-som**

Para o desenvolvimento deste trabalho foi montada uma bancada experimental para se analisar a textura dos materiais bem como medir as tensões residuais geradas pela soldagem, através do emprego do sistema ultra-sônico para a medida da velocidade das ondas. O diagrama de blocos da fig. 14 e a fotografia da fig. 15 permitem um melhor entendimento do princípio de funcionamento e dos componentes que integram o sistema.

O sistema de medição é composto de um aparelho de ultra-som convencional que funciona como gerador de pulsos e simultaneamente como receptor dos ecos. Os pulsos gerados excitam um transdutor piezoelétrico que transmite ao material em análise as ondas ultra-sônicas. Estas ondas penetram no material e retornam, mostrando na tela do aparelho os ecos relativos ao tempo decorrido para a onda se propagar ao longo da espessura da chapa.

Utilizou-se um transdutor piezoelétrico de ondas cisalhantes com incidência normal. Optou-se por este tipo de transdutor por permitir o uso da técnica da birrefringência acústica para análise de tensões. Além disso, a velocidade de propagação dessas ondas é mais sensível às variações devido às tensões e textura do material, do que as ondas longitudinais propagando transversalmente à tensão. Também o fato da velocidade das ondas cisalhantes ser aproximadamente a metade daquelas ondas longitudinais, conforme citado no item 2.4.1 da revisão bibliográfica, facilita a medida do tempo de percurso da onda.

O acoplante utilizado para eliminar a camada de ar entre o transdutor e a chapa e facilitar a transmissão das ondas ultra-sônicas foi o óleo SAE 40.

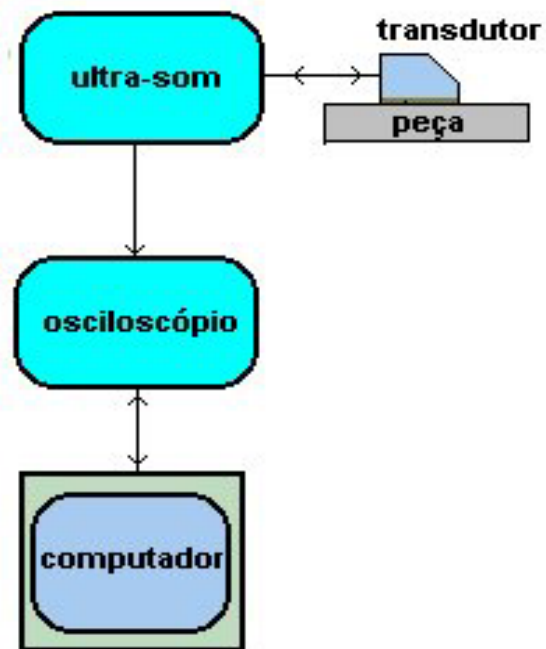


Fig. 14. Diagrama de blocos do sistema de medições.

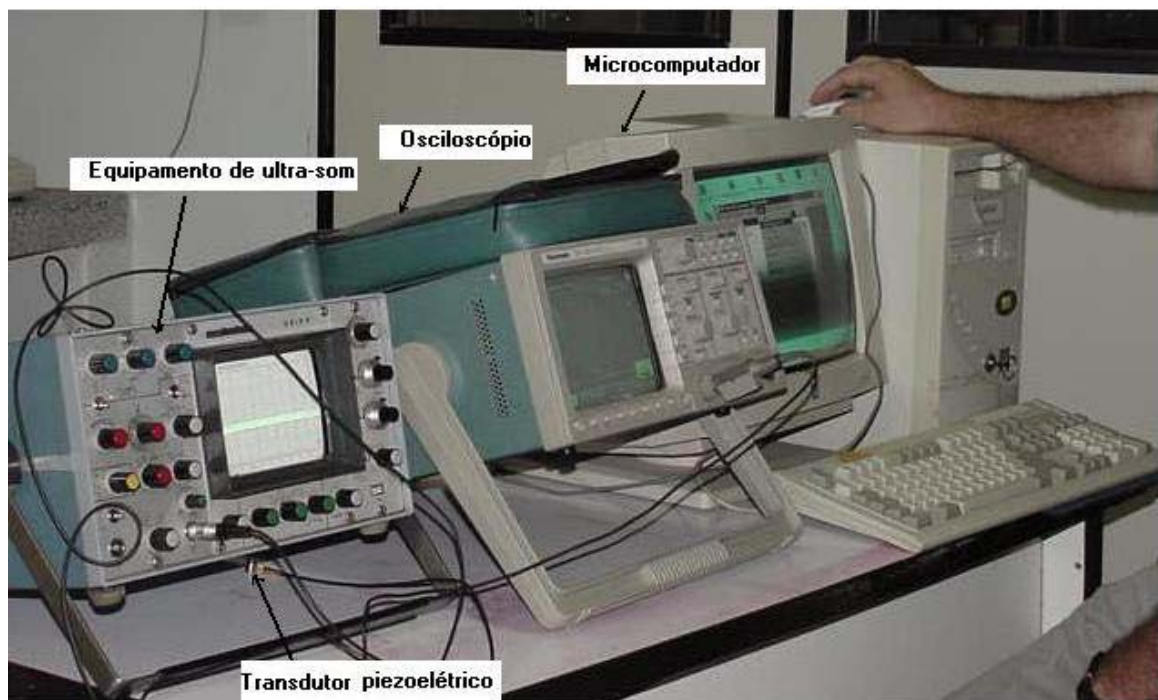


Fig. 15. Componentes que integram o sistema de medições por ultra-som.

Neste trabalho foi utilizado um procedimento para medida do tempo de transito da onda ultra-sônica descrito por Bittencourt [2000], utilizando-se um algoritmo de correlação cruzada e realizando um processo de interpolação para melhorar a resolução.

O equipamento para a geração dos pulsos de ondas ultra-sônicas possui uma interface para a visualização dos sinais, no entanto, não oferece condições para a leitura deles. Sendo assim, foi necessária a implementação de um circuito para a exportação dos sinais do equipamento de ultra-som para o osciloscópio para que se realizasse a leitura da onda. A natureza desta leitura é analógica, isto é, as amplitudes e os tempos se desenvolvem de forma contínua. Para o cálculo do tempo de percurso preferiu-se uma técnica digital em lugar de outras técnicas analógicas existentes, devido aos menores custos envolvidos na sua implementação. O uso da técnica digital permite o armazenamento das leituras num microcomputador para processamento posterior. Sendo assim, a bancada de testes constituiu-se em um equipamento de ultra-som, um osciloscópio digital e um micro-computador. Destes equipamentos, apenas o primeiro é de uso específico, no entanto o osciloscópio é um instrumento popular no ambiente de experimentação assim como o microcomputador.

Para a transferência de informações do osciloscópio ao microcomputador utilizou-se a interface IEEE 488.2-1987 (GPIB). Em relação ao osciloscópio, esta interface permite o controle do instrumento e a aquisição dos dados de forma remota sendo que os estados de operação do instrumento podem ser conhecidos por esta via [Manual de instrução Tektronix/ 94]. Portanto, para a aquisição de dados instalou-se no computador uma placa de aquisição compatível com a interface GPIB e desenvolveu-se um programa para o ambiente Windows que permite a aquisição dos dados e posterior armazenamento no computador.

Conforme exposto, a bancada foi implementada em dois módulos: aquisição e cálculo do tempo entre ecos. Sendo assim, é possível se realizar melhoramentos em cada um independentemente. Por exemplo, pode-se usar equipamento de ultra-som com conexão direta GPIB apenas com ligeiras mudanças no programa de aquisição. Existe ainda a possibilidade de envio dos dados obtidos para que sejam processados conforme os métodos desenvolvidos por outros pesquisadores.

Especificação dos equipamentos e dispositivos do sistema de medições:

- Osciloscópio:

Marca Tektronix, modelo TDS 420; 150 MHz.

- Equipamento de ultra-som:

Marca Krautkrämer, modelo USIP 11.

- Transdutor piezoelétrico:

Transdutor de ondas cisalhantes polarizadas com incidência normal, marca Panametrics, modelo V 156, frequência 5 MHz, tamanho 6,35mm de diâmetro.

- Placa de comunicação:

Compatível com HPIB, IEEE488.1 (GPIB), marca Hewlett Packard, modelo HP 82350.

### **3.2. Sistema desenvolvido para o processamento do sinal ultra-sônico adquirido**

Com a finalidade de suprir a falta de sensibilidade dos instrumentos de medições, os quais deveriam ser capazes de registrar variações de tempo com incerteza na ordem de nanosegundos, para medirem a variação da velocidade da onda ultra-sônica devido à tensão residual, desenvolveu-se um programa de processamento de sinal com a utilização de um algoritmo de correlação cruzada (Anexo A). Para aumentar-se a capacidade de resolução das medidas de tempo obtidas pela correlação cruzada, que tem como limitação o tempo de amostragem do sinal adquirido, aplicou-se sistemas de filtragens que permitem a interpolação de pontos ao sinal adquirido na forma discreta. Este sistema de processamento é descrito no Anexo B.

### **3.3. Determinação da textura de chapas de aço**

Com o intuito de se avaliar a eficiência do método ultra-sônico para determinar a direção de laminação, além das chapas a serem soldadas para a determinação das tensões residuais, três outros aços com diferentes espessuras, condições de laminação e tratamento térmico foram previamente caracterizados. A tabela 1 traz a análise química (espectrometria de emissão óptica) e espessura das chapas de aço testadas.



Tabela 1. Composição química e espessuras dos aços ABNT 1045, ABNT 1010, ASTM A516 grau 70 e ABNT 1012.

AÇO	ELEMENTO (%) PESO						ESPESSURA (mm)
	C	Si	Mn	P	S	Al	
ABNT 1045	0,47	0,22	0,71	0,018	0,011	0,05	5,0
ABNT 1010	0,11	0,27	0,76	0,013	0,005	0,03	12,7
ASTM A516 Grau 70	0,21	0,25	1,10	0,019	0,00	0,02	25,4
ABNT 1012	0,12	0,25	0,76	0,013	0,011	0,03	17,0

A chapa de aço ABNT 1045, conforme informação do LABCON /UFSC, inicialmente laminada a quente, foi laminada a frio posteriormente em Laboratório, tendo sofrido uma redução de 21% na espessura. Ou seja, a espessura inicial de 6,35 mm após a redução ficou em 5,0 mm.

As chapas de aço ASTM A516 grau 70 e ABNT 1010 e 1012 foram obtidas pelo processo de laminação a quente.

### 3.3.1. Determinação da direção de laminação por metalografia

Para a determinação metalográfica da textura as amostras foram retiradas com relação à espessura da chapa, no sentido longitudinal à direção de laminação (baseando-se na aparência visual do bordo da chapa). Foram lixadas, polidas e atacadas com Nital 2% para melhor visualização. Foi empregado um microscópio ótico marca Carl Zeiss Jena, modelo Neophot 30.

Para o aço ABNT 1012, material o qual foi utilizado na avaliação das tensões residuais decorrentes da soldagem, foram preparadas duas amostras para o ensaio metalográfico com a

finalidade de melhor visualizar sua textura ao longo da espessura. A fig. 16 mostra as posições onde foram retiradas as amostras. Uma no centro e a outra próximo à superfície.

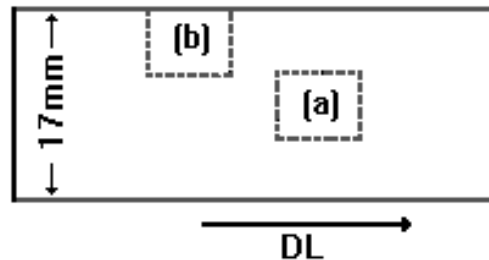


Fig. 16. Posições da chapa onde foram retiradas as 2 (duas) amostras para o ensaio metalográfico.

### 3.3.2. Determinação da direção de laminação por ultra-som

Determinou-se por ultra-som a direção de laminação (DL) do material colocando-se o transdutor em alguns pontos na superfície da chapa e analisando-se o tempo de percurso da onda ao longo da espessura. Para esta análise é muito importante que se conheça previamente o comportamento da velocidade da onda ultra-sônica em duas direções de polarização (DP), com relação à DL do material. O cálculo do tempo de percurso da onda ultra-sônica foi efetivado com um programa desenvolvido no aplicativo MATLAB. Os dados deste programa encontram-se no Anexo B.

O método consistiu nas seguintes etapas:

a) Em pontos selecionados na superfície da chapa traçaram-se duas retas perpendiculares, obtendo-se assim quatro quadrantes.

b) Tomou-se uma direção como referência inicial, e alinhou-se a DP do transdutor com esta direção. A seguir deu-se um giro de  $90^\circ$  no transdutor alinhando-o para a outra posição. (fig. 17). O sinal ultra-sônico foi adquirido com o transdutor nessas duas posições. Este procedimento repetiu-se para todos os pontos selecionados com o intuito de se determinar os tempos de percurso da onda através da espessura da chapa. Em função da anisotropia do material, cada sinal obtido para uma determinada direção, chegará adiantado ou atrasado em relação ao outro. Para o aço a menor velocidade ocorre quando a direção de polarização está perpendicular à direção de laminação.

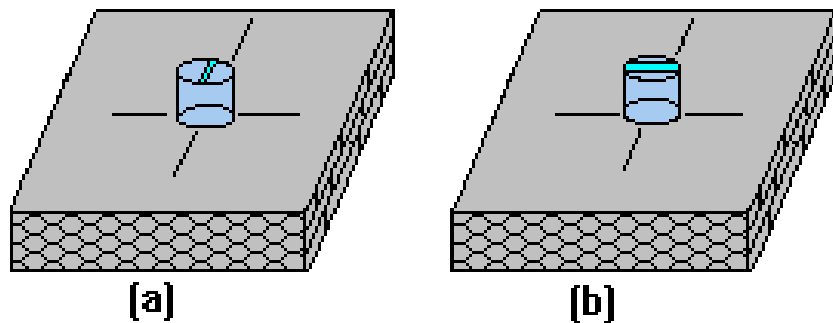


Fig. 17. Desenho esquemático mostrando duas diferentes posições do transdutor: (a) DP alinhada com a DL; (b) DP  $90^\circ$  com a DL.

### 3.4. Birrefringência acústica do aço ABNT 1012

Esta análise tem a finalidade de avaliar a homogeneidade do material na condição como recebido, com relação ao efeito da textura ou de tensões residuais iniciais oriundas de processos de fabricação anteriores, tais como corte, laminação, usinagem, etc.

A birrefringência mostra a anisotropia do material com relação à onda ultra-sônica. A birrefringência inicial (**B<sub>0</sub>**), isto é, antes do material ser submetido à tensões, tanto do CP de tração como do CP a ser soldado, foi determinada dividindo-se estes em regiões (quadrículas) e fazendo-se a aquisição dos tempos de percurso da onda ultra-sônica com o transdutor polarizado, ora paralelamente, ora perpendicular à direção de laminação do material.

Posteriormente, determinou-se a birrefringência (**B**) do material com tensões, isto é, após a soldagem. No material soldado os tempos foram medidos nas mesmas regiões anteriores, com a DP do transdutor ora alinhada ora perpendicular à direção do cordão de solda. A birrefringência foi calculada subtraindo-se o tempo de percurso da onda com a DP perpendicular ao cordão de solda, do tempo de percurso com a DP paralela ao cordão de solda, e dividindo-se este valor pela média dos tempos nas duas direções. Para estes cálculos utilizou-se a equação 26.

### **3.5. Determinação da constante acustoelástica do material através do ensaio ultra-sônico**

Para o cálculo das tensões é necessário o conhecimento do efeito acustoelástico do material. Calibrou-se este efeito através da determinação da constante acustoelástica (**m**) do material. Esta constante depende do material, sua estrutura, do tipo de onda empregada (longitudinal, cisalhante, superficial), da direção de polarização da onda e da direção de propagação. A constante acustoelástica reflete o comportamento da onda ultra-sônica com relação à variação de sua velocidade, ao atravessar um material tensionado.

Para o levantamento desta constante, preparou-se um corpo de prova de tração, de mesmo material ao que será soldado para a determinação das tensões (aço ABNT 1012). O corpo de

prova foi usinado de maneira que sua direção de laminação coincidisse com a direção de aplicação da carga. (fig. 18).

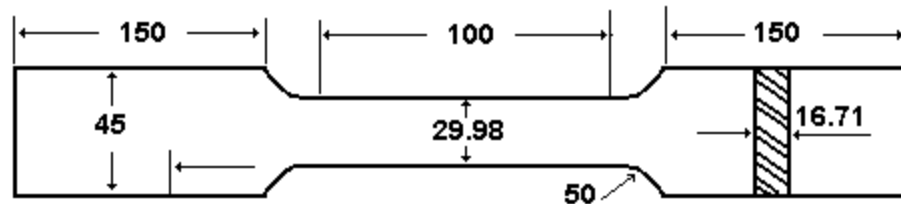


Fig. 18. Dimensões (mm) do corpo de prova.

Determinou-se a constante acustoelástica verificando-se a variação da velocidade da onda ultra-sônica ao passar através do corpo de prova quando submetido a uma carga trativa uniaxial. Este ensaio consistiu na fixação do corpo de prova em uma máquina de ensaio de tração aplicando-se uma carga progressiva trativa, ao mesmo tempo em que se fez a medida do tempo de percurso da onda ultra-sônica, com a DP alinhada e após, formando 90° com a direção de aplicação da carga. Fizeram-se as medidas conforme pode ser visualizado na foto (fig. 19), sempre em um mesmo local, isto é, no centro do corpo de prova. É essencial saber o limite de escoamento do material a ser ensaiado para que, a carga de tração aplicada durante o ensaio não atinja a carga em que o material começa a escoar. Recomenda-se que a carga seja aumentada progressivamente até que se atinja no máximo 90% da tensão de escoamento.

Inicialmente fez-se a medida dos tempos nas duas direções para o CP sem carga. Em seguida foi-se aumentando a carga com um incremento de 9,86 MPa até a carga de 176 MPa (aproximadamente 54% da  $\sigma_e$ ). Embora este valor pudesse alcançar até 294 MPa o que equivale a 90% da tensão de escoamento ( $\sigma_e=327$  MPa) não foi possível uma solicitação maior do CP

pois, apesar da capacidade nominal da máquina ser 10 kN, em operação somente se conseguiu aplicar 9 kN.

O corpo de prova foi tracionado em um equipamento marca MTS, modelo 810 Material Test System.



Fig. 19. Posições no corpo de prova onde foram feitas as medidas durante o ensaio de tração.

Com os valores obtidos no ensaio, traçaram-se duas retas de carga aplicada x tempo de percurso, uma para a onda com a DP perpendicular à direção de aplicação da carga, posição (a) da fig. 20, e a outra com a direção de polarização paralela à direção de aplicação da carga, posição (b) da fig. 20.

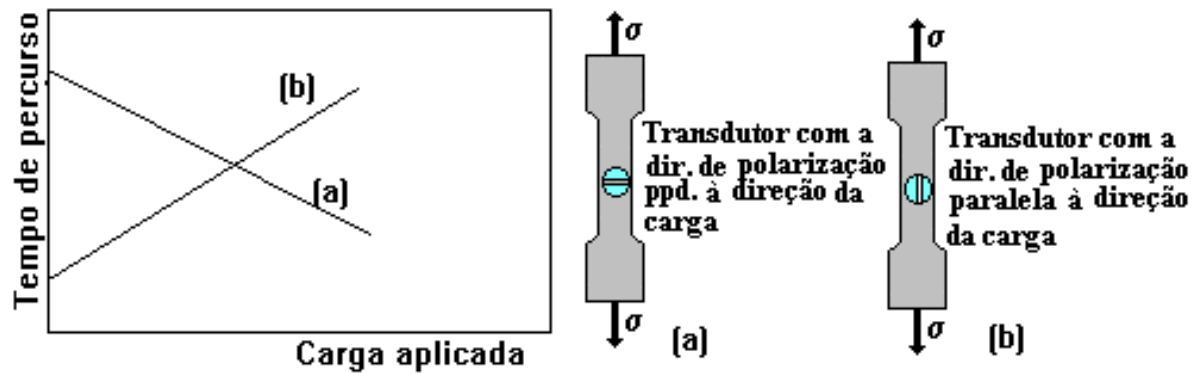


Fig. 20. Exemplo esquemático mostrando a obtenção das retas: carga aplicada x tempo de percurso da onda ultra-sônica.

Através dos valores dos tempos das duas retas aplicando-se a equação da birrefringência, equação [26], obteve-se uma nova reta cujo coeficiente angular é a constante acustoelástica do material. Esta constante será utilizada na equação [27], para o cálculo das tensões residuais a partir das velocidades das ondas ultra-sônicas obtidas.

### 3.6. Determinação por ultra-som, das tensões principais atuando na peça soldada

A avaliação da distribuição de tensões residuais originadas pela soldagem empregando-se o sistema ultra-sônico desenvolvido, foi feita em uma chapa de aço comum ao carbono (ABNT 1012), conforme especificada no item 3.3. A preparação da chapa consistiu na usinagem de um chanfro em V ( $60^0$ ), bem como a retífica de suas duas faces, para que o acoplamento transdutor peça fosse melhorado. A fig. 21 mostra as dimensões da chapa. Realizou-se uma soldagem de topo com o processo TIG para o passe de raiz, sendo os demais feitos com processo MIG (13 passes).

Dados da soldagem para o passe de raiz:

- Tipo de vareta para o passe de raiz: diâmetro 2,4 mm
- Corrente: 120A
- Tensão: 13V
- Velocidade de soldagem: 12cm/min

Demais passes:

- Tipo de arame: ERS 70 S6, diâmetro 1,2 mm
- Corrente: 130A
- Tensão: 22V
- Velocidade de soldagem: 16cm/min

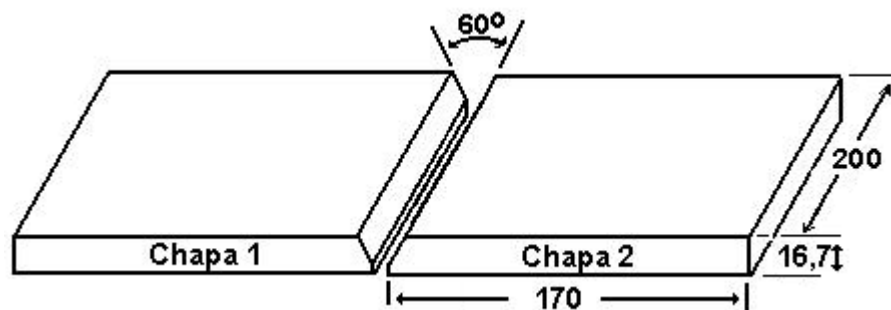


Fig. 21. Dimensões das chapas a serem soldadas.

Para se avaliar a distribuição de tensões após a soldagem, a chapa foi novamente analisada, com o transdutor polarizado paralelamente e perpendicularmente à direção do cordão de solda. Para cada uma destas situações foram realizadas as medidas do tempo de percurso da onda ultra-sônica. Desta maneira traçaram-se curvas de distribuição de tensões paralelamente ao cordão de solda, para as linhas correspondentes às posições A1, B1 e C1 da chapa 1 e A2, B2 e



C2 da chapa 2. As medidas para as curvas transversais ao cordão de solda foram feitas para as linhas correspondentes às posições C, D e E conforme indicado na fig. 22.

Na região do cordão e na zona afetada pelo calor (ZAC) não foram feitas medidas, pois nestes locais a microestrutura do material é alterada, sendo assim a constante acustoelástica nestes locais é diferente daquela determinada para o material de base. Portanto, na fórmula do cálculo de tensões não se pode considerar a constante acustoelástica como sendo a mesma do restante do material.

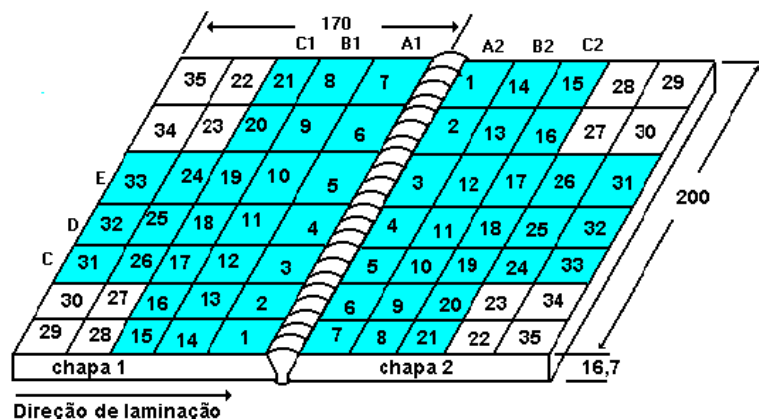


Fig. 22. Pontos de medições dos tempos percurso da onda ultra-sônica para a obtenção das curvas de distribuição de tensão na chapa soldada.

### 3.7. Determinação pelo método do furo com extensômetros, das tensões principais atuando na peça soldada

Os resultados da análise das tensões residuais da chapa soldada pela a técnica ultra-sônica foram comparados com a técnica de medição do furo cego com extensômetros de resistência (tipo roseta). As medidas foram feitas em oito pontos transversalmente ao cordão de solda, sendo quatro em cada chapa (pontos 4, 11, 18 e 25 das chapas 1 e 2), correspondendo à linha D da fig 22. O ensaio foi realizado no Labmetro na UFSC, conforme a Norma ASTM E 837/[1995].

## **4. Resultados e discussão**

A bancada experimental de ensaio ultra-sônico para a determinação da direção de laminação dos materiais (textura) bem como das tensões residuais em uma chapa soldada, baseando-se na variação da velocidade da onda ao atravessar o material, apresentou os resultados abaixo. A taxa de amostragem utilizada foi de  $1 \times 10^9$  amostras/ segundo.

### **4.1. Avaliação comparativa da textura de chapas de aço por metalografia e ultra-som**

#### **4.1.1. Chapa de aço ABNT 1010 laminado a quente**

Inicialmente pode-se ver pelo resultado da análise metalográfica, fig. 23, que na chapa de aço ABNT 1010 os grãos não possuem uma orientação preferencial. Admite-se que a recristalização ocorrida após a laminação a quente, praticamente elimina a textura preferencial. Comparativamente o gráfico da fig. 24 resume os resultados das medidas por ultra-som realizadas em 11 (onze pontos) distribuídos na chapa: os tempos de percurso da onda com a DP do transdutor paralela e perpendicular à DL para estes pontos. Os detalhes deste procedimento estão descritos no item 3.3.2 do capítulo anterior.

Constata-se pelo gráfico da fig. 24 que para alguns pontos analisados (pontos 1, 2, 3, 4, 5 e 8) o tempo de percurso da onda com a DP paralela e perpendicular à DL são iguais. Para os demais, os tempos ora são maiores (10 e 11) ora menores (6, 7 e 9) com a DP paralela à DL. Este comportamento mostra não haver uma definição no material com relação ao alinhamento dos grãos, o que foi comprovado pela análise metalográfica. A maior diferença entre os tempos

ocorreu para o ponto 11 e foi de  $0,00375\mu\text{s}$  (3,75ns), sendo que as diferenças entre os tempos variaram em média de  $0,000114\mu\text{s}$  (0,114ns) para os onze pontos.

#### **4.1.2. Chapa de aço ABNT 1045 laminada a frio.**

Neste caso a análise metalográfica (fig. 25) revela uma textura mais bem definida, com grãos alongados no processo de conformação a frio.

Os resultados da avaliação da textura por ultra-som em 14 (quatorze) pontos na superfície da chapa estão representados na fig. 26. Para esse aço encruado 10 (dez) dos pontos analisados apresentaram o tempo de percurso da onda-ultra-sônica maior com a DP perpendicular à DL. Este resultado confirma a análise metalográfica. A maior diferença entre os tempos ocorreu no ponto 1 e foi de  $0,005\mu\text{s}$  (5ns), sendo que as diferenças entre os tempos variaram em média de  $0,00168\mu\text{s}$  (1,68ns) para os quatorze pontos.

#### **4.1.3. Chapa de aço ASTM A516 grau 70 laminado a quente**

A fig. 27 mostra a microestrutura do aço A516 grau 70. As medidas por ultra-som foram feitas em 11 (onze) pontos e em duas direções para cada ponto, conforme nos casos anteriores. Através dos resultados pode-se constatar que esta chapa apresenta uma direção de laminação bastante definida, o ensaio metalográfico também mostra isto. Para a maioria dos pontos medidos ao longo da chapa, o tempo de percurso da onda ultra-sônica é menor ou igual quando a DP está paralela à DL (fig. 28). A maior diferença entre os tempos é de  $0,0025\mu\text{s}$  (2,5ns) e a média da diferença entre os tempos foi de  $0,00068\mu\text{s}$  (0,68ns).

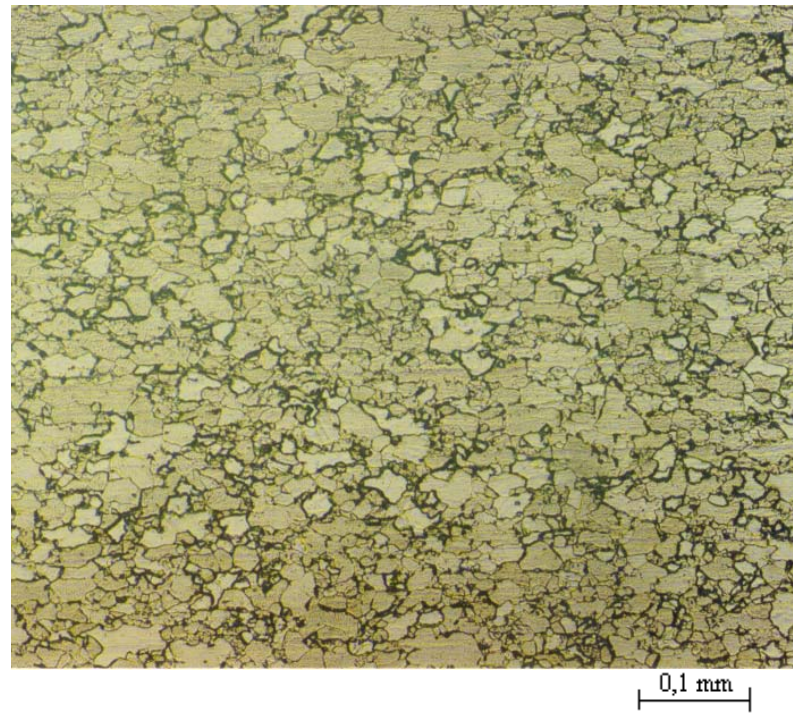


Fig. 23. Corte longitudinal à DL mostrando a textura da chapa de aço ABNT 1010.  
(Aumento de 100 X).

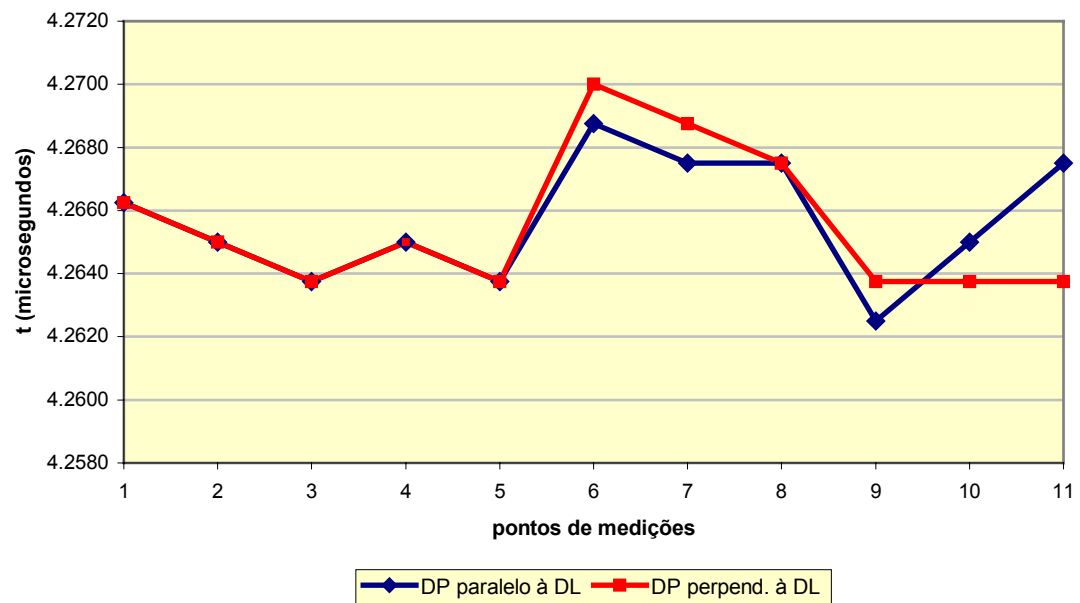


Fig. 24. Tempo de percurso da onda ultra-sônica para o aço ABNT 1010, com a DP paralela e perpendicular à DL.

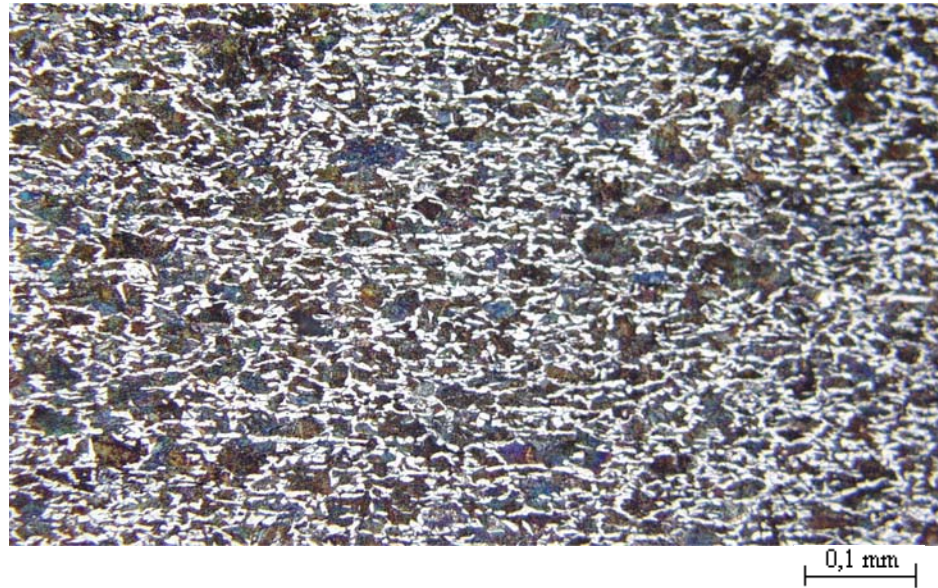


Fig. 25. Corte longitudinal à DL mostrando a textura de chapa encruada de aço ABNT 1045.  
(Aumento de 100X).

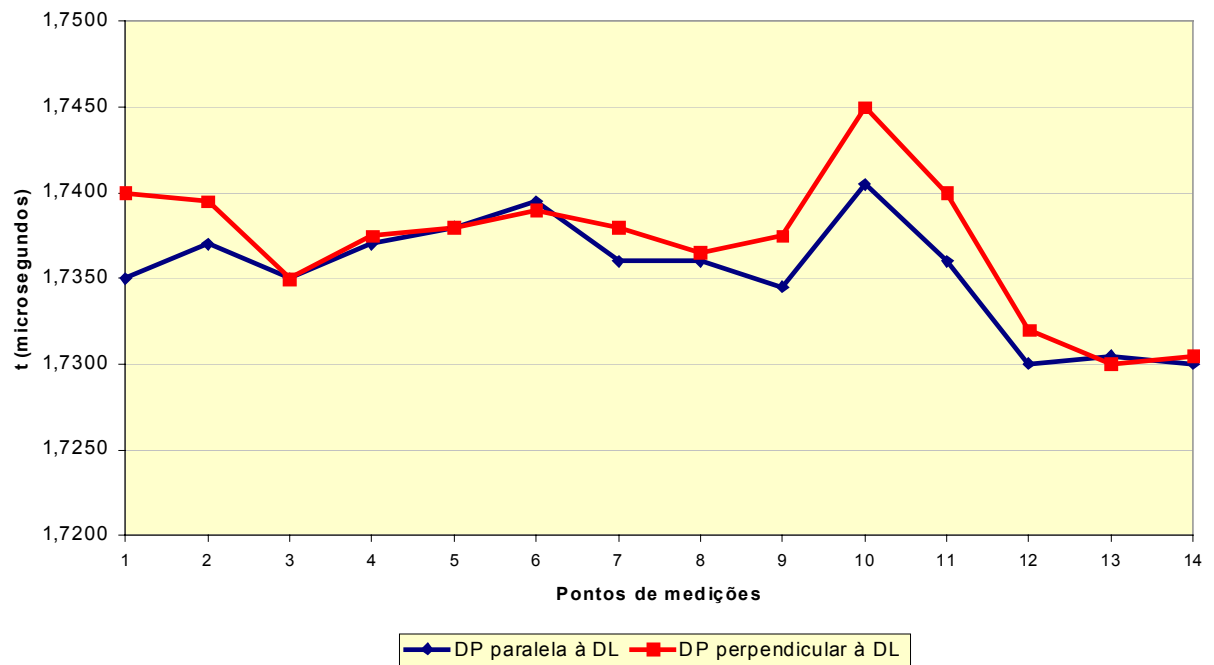


Fig. 26. Tempo de percurso da onda ultra-sônica para o aço ABNT 1045, com a DP paralela e perpendicular à DL.





Fig. 27. Corte longitudinal à DL mostrando a textura de chapa de aço A516 grau 70.

(Aumento de 100 X).

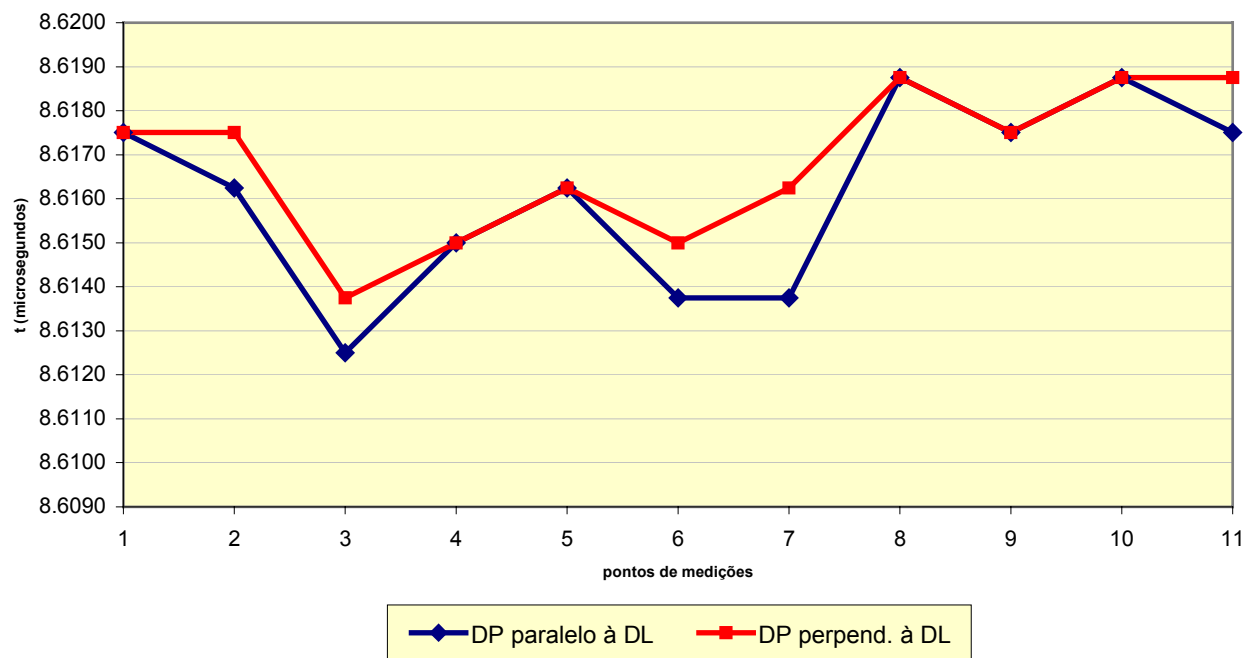


Fig. 28. Tempo de percurso da onda ultra-sônica para o aço ASTM A516 grau 70, com a DP paralela e perpendicular à DL.

#### **4.1.4. Chapa de aço ABNT 1012 laminada a quente**

As figs. 29 e 30 mostram em um corte longitudinal paralelo à direção de laminação respectivamente, a microestrutura da região central e de uma região próxima à superfície da chapa. As amostras foram retiradas conforme a fig. 16 do item 3.3.1. Observou-se não haver uma orientação preferencial dos grãos bem definida em toda a espessura da chapa. Na região central os grãos encontram-se mais alinhados, enquanto que, próximo à superfície praticamente não se percebe alinhamento.

A avaliação da textura por ultra-som foi mais detalhada nessas chapas de aço ABNT 1012 destinadas ao estudo das tensões residuais originadas pela soldagem para tanto, cada chapa foi dividida em regiões (quadrículas) numeradas conforme indicado na fig. 31.

Para cada quadrícula posicionou-se o transdutor com a DP ora paralela, ora perpendicular à DL. Este procedimento repetiu-se para todos os pontos selecionados com o intuito de se determinar os tempos de percurso da onda através da espessura da chapa.



Fig. 29. Corte longitudinal à DL mostrando a textura no centro da chapa de aço ABNT 1012. (Aumento de 100X).

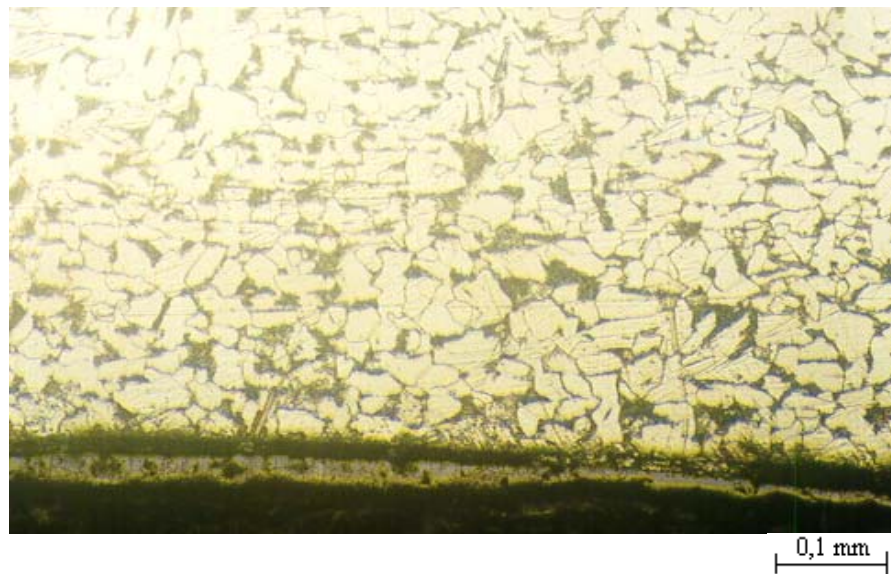


Fig. 30. Corte longitudinal à DL mostrando detalhes da região próxima à superfície da chapa de aço ABNT 1012. (Aumento de 100X).



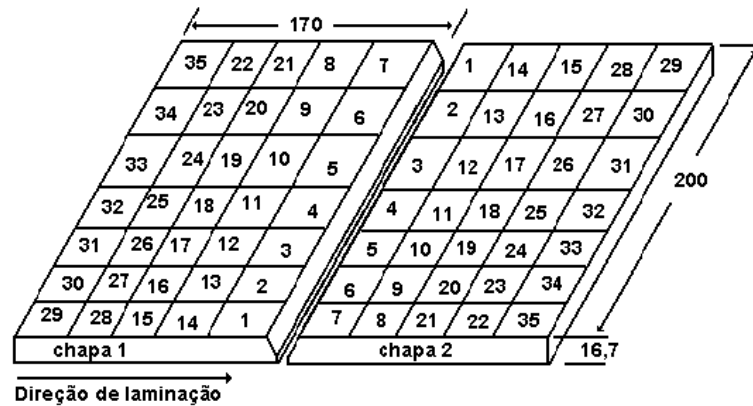


Fig. 31. Chapas divididas em regiões (quadrículas) para a determinação da direção de laminação por ultra-som.

As figuras 32 e 33 mostram a variação do tempo de percurso da onda ultra-sônica quando a DP do transdutor está paralela e perpendicular à DL, para as chapas 1 e 2 respectivamente.

Constata-se que na chapa 2 para a maioria dos pontos analisados a velocidade da onda foi maior quando a DP estava alinhada com a DL, ou seja, o tempo de percurso da onda ultra-sônica foi menor, sendo que o valor máximo dessa diferença foi de  $0,0062\mu\text{s}$  (6,2ns). A média da diferença entre os tempos foi de  $0,00132\mu\text{s}$  (1,32ns) para os trinta e cinco pontos. Sabe-se que para o aço a maior velocidade ocorre quando a DP está paralela à DL, mostrando assim que os resultados estão dentro do que se esperava. Para alguns pontos os tempos foram iguais para ambas posições do transdutor, mostrando o comportamento característico de um material isotrópico. Portanto, supõe-se não haver uma DL bem definida nestas regiões, ou seja, uma orientação preferencial dos grãos. Uma outra suposição seria de que a diferença entre os tempos medidos fosse tão pequena, de maneira que o sistema de aquisição não alcançasse a resolução

necessária para diferenciar esta variação. Para alguns pontos o resultado foi oposto ao esperado, isto é, a velocidade da onda ultra-sônica foi menor quando a DP estava alinhada com a DL, o que pode ter ocorrido devido à uma anisotropia causada por tensões internas, oriundas de processos de preparação das chapas, como corte, usinagem e outros, já que as chapas não passaram por tratamento térmico de alívio de tensões. Na chapa 1 a diferença entre os tempos obtidos com a DP paralela e perpendicular à DL foram bastante próximos, sendo que o valor máximo foi de  $0,005\mu\text{s}$  (5ns) e a diferença média foi de  $0,00032\mu\text{s}$  (0,32ns). Constatou-se inclusive uma DL menos definida para este trecho da chapa, comparando-se com a chapa 2. Comportamento este não explicável visto que as duas amostras foram retiradas de uma mesma chapa e as medidas foram realizadas nas mesmas condições de ensaio.

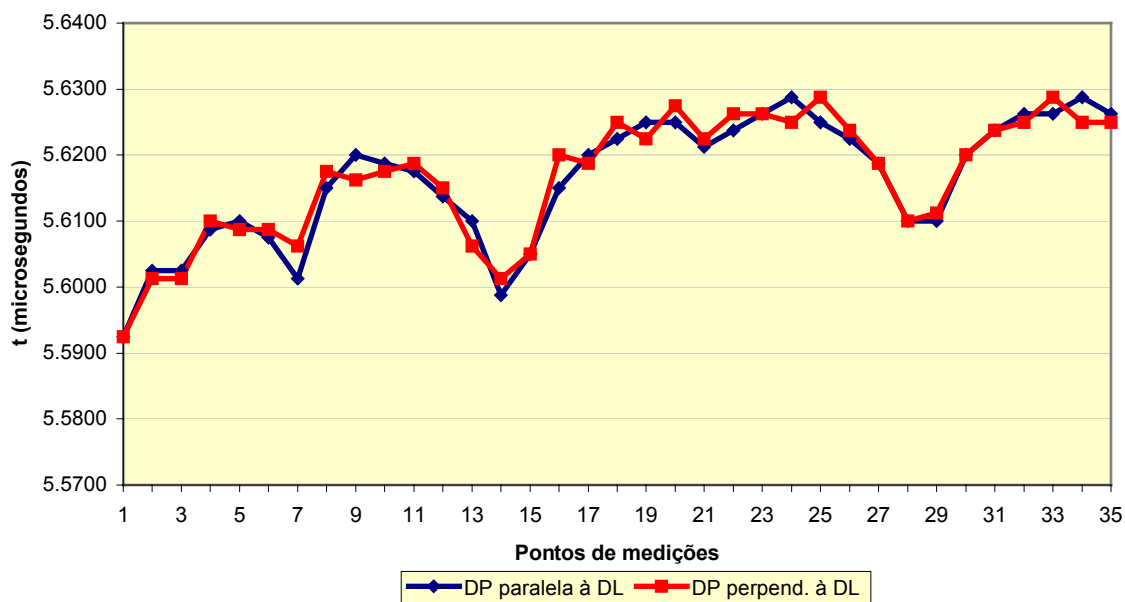


Fig. 32. Tempo de percurso da onda ultra-sônica para os pontos da chapa 1, com a DP paralela e perpendicular à DL. (Aço ABNT 1012).

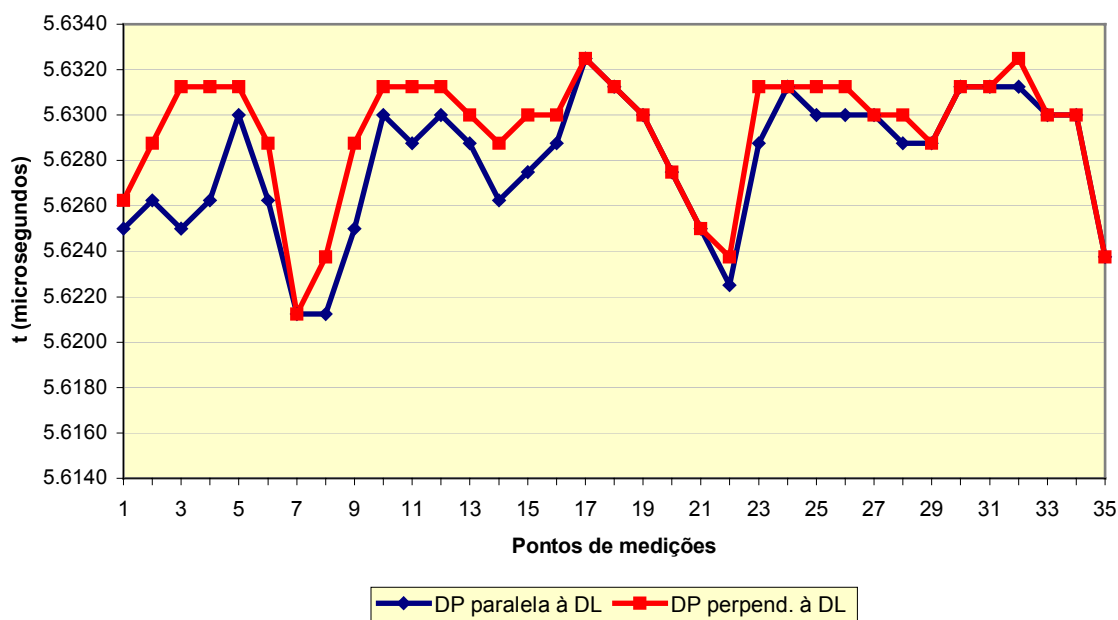


Fig. 33. Tempo de percurso da onda ultra-sônica para os pontos da chapa 2, com a DP paralela e perpendicular à DL. (Aço ABNT 1012).

#### **4.2. Verificação da confiabilidade do programa de processamento de sinais (MATLAB) do Labsolda**

Com o intuito de verificar se o programa de processamento de sinais (MATLAB), desenvolvido no Labsolda e utilizado como parte do sistema para se medir a velocidade das ondas ultra-sônicas, apresentava o mesmo resultado quando comparado com o sistema desenvolvido pelo Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), os sinais adquiridos na inspeção de uma mesma chapa (aço ABNT 1010) com espessura de 16mm foram processados nos dois locais.

A fig. 34 mostra a diferença de tempos entre as duas direções ortogonais com relação à DL para 12 (doze) pontos da chapa. Os valores de tempos obtidos pelos dois programas foram bastante próximos apresentando uma variação da ordem de 0,25 a 0,65ns com a interpolação feita inserindo-se 6 amostras. Isto garante a confiabilidade do programa utilizado para o desenvolvimento deste trabalho. Destaca-se com relação a esse aço (ABNT 1010), a grande diferença entre os tempos, da ordem de 0,02 $\mu$ s (20ns) quando o transdutor está com a DP paralela e perpendicular à DL. Infelizmente, por questões logísticas, o IEN não pode disponibilizar uma amostra, sendo assim não foi possível a aquisição dos sinais deste material no Labsolda nem a análise metalográfica da textura afim de se comparar tais resultados com os demais aços analisados.

Finalmente, ainda com intuito de qualificar a bancada experimental montada no Labsolda, uma amostra do aço ABNT 1012 (metal base para a junta soldada) foi analisada por pesquisadores do IEN pela técnica da birrefringência por ultra-som. Confirmaram eles ser este um material pouco anisotrópico, pois os tempos medidos nas duas direções foram bastante próximos, sendo inclusive em vários pontos iguais. A diferença máxima medida foi 0,0075 $\mu$ s (7,5ns), valor este próximo do que havíamos obtido em nossas medições para esta mesma chapa.

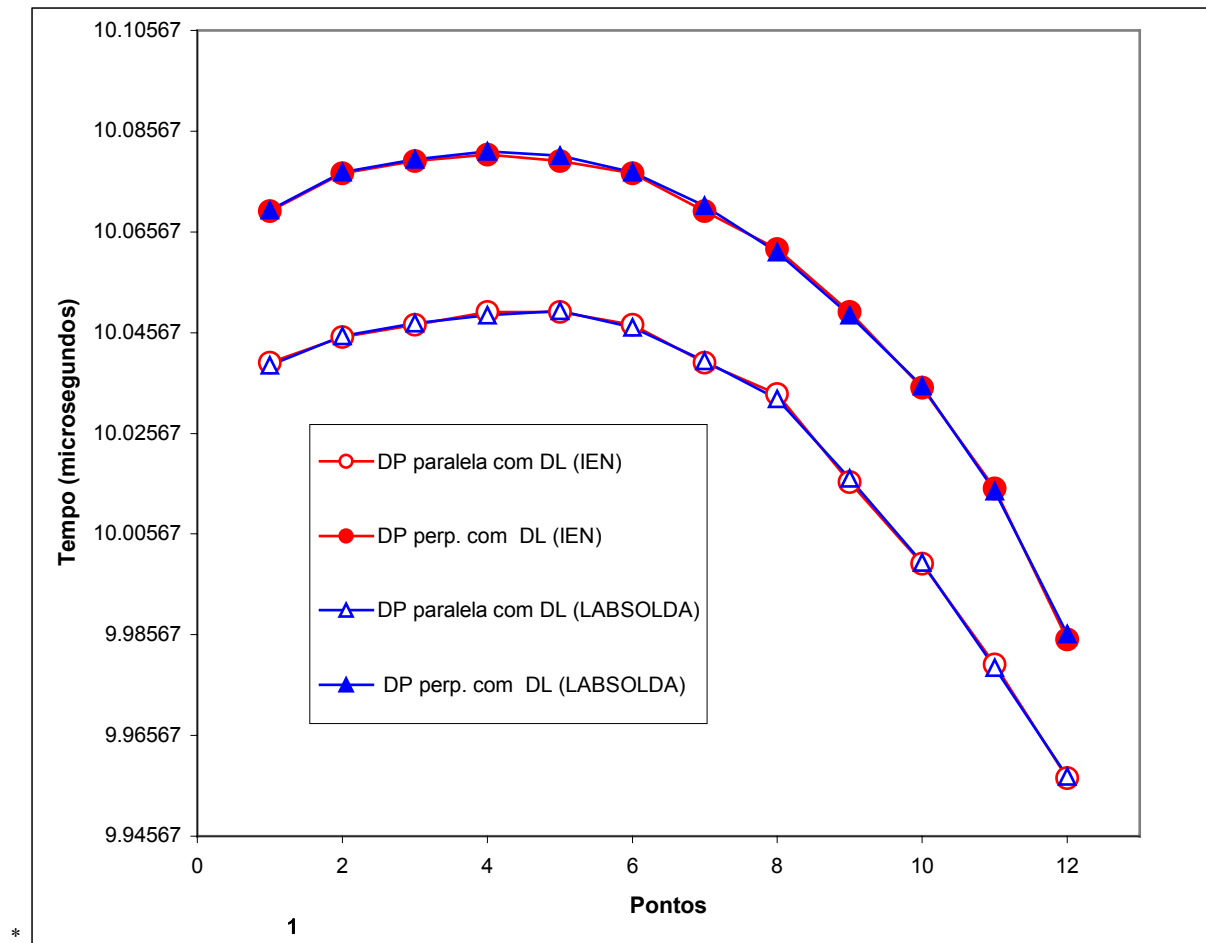


Fig. 34. Tempo de percurso da onda ultra-sônica para aço ABNT 1010, com a DP paralela e perpendicular à DL. Dados comparativos do Labsolda e IEN \*.

### 4.3. Análise da birrefringência acústica de chapas de aço ABNT 1012

#### 4.3.1. Análise do CP de tração

A fig. 35 mostra os pontos no CP preparado para o ensaio de tração, onde foram feitas as medidas da velocidade da onda ultra-sônica para a análise da birrefringência.

\* Via e-mail

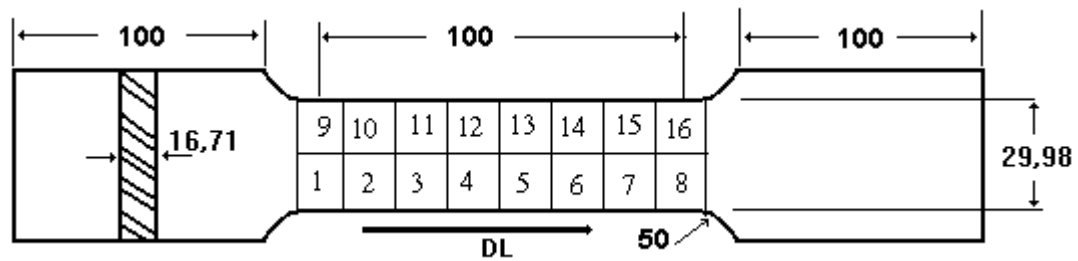


Fig. 35. CP de tração dividido em quadriculas para a análise da birrefringência.

Os tempos obtidos de percurso da onda-ultra-sônica com a DP alinhada e perpendicular à DL respectivamente, para os pontos especificados no CP estão mostrados na forma de gráficos de colunas das figs. 36 e 37.

Calculou-se a birrefringência inicial (**B<sub>0</sub>**) subtraindo-se o tempo de percurso da onda com a DP perpendicular à DL do tempo de percurso com a DP alinhada com a DL e dividindo-se este valor pela média dos tempos nas duas direções (equação 26).

A distribuição da birrefringência acústica no CP tração pode ser visualizada no gráfico de barras da fig. 38. Constata-se uma variação não homogênea com relação à birrefringência acústica inicial. Esperava-se este comportamento visto tratar-se de um material com uma textura variável ao longo da chapa, e também por não ter sido submetido a um tratamento térmico de alívio de tensões. A birrefringência acústica negativa no ponto 12 do CP significa que para este ponto o tempo de percurso da onda polarizada paralelamente à DL foi maior do que o tempo com a DP perpendicular à DL, resultado este oposto ao esperado, porém justificável se observarmos os resultados da análise da textura do material.

Na fig. 39 estão os valores dos tempos de percurso da onda nas duas direções para os 16 (dezesseis) pontos do CP.

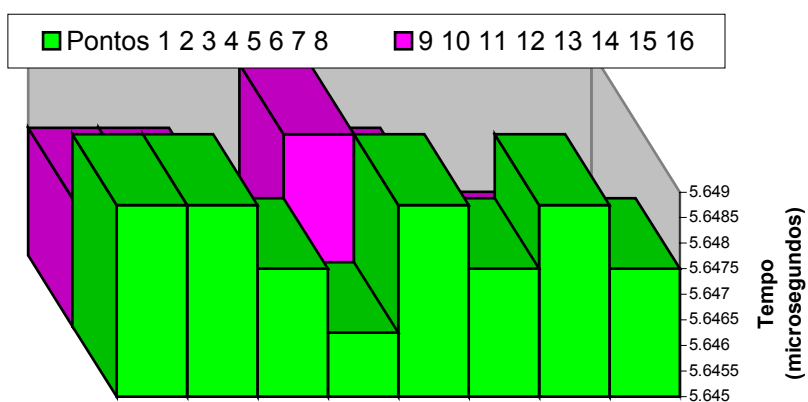


Fig. 36. Tempos de percurso da onda no CP tração com a DP alinhada com a DL.

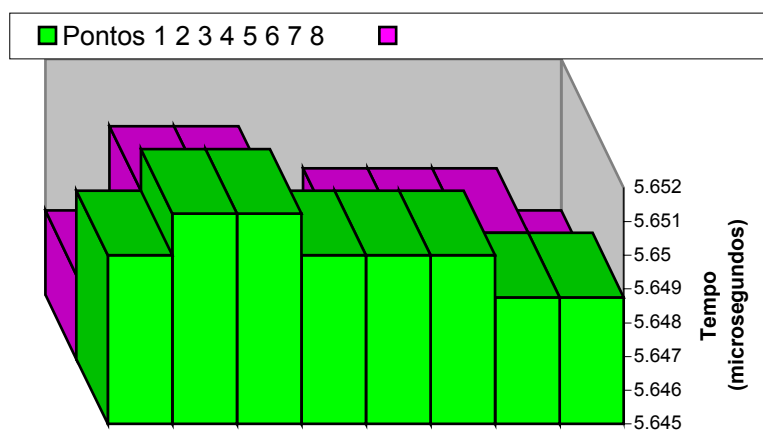


Fig. 37. Tempos de percurso da onda no CP tração com a DP perpendicular à DL.

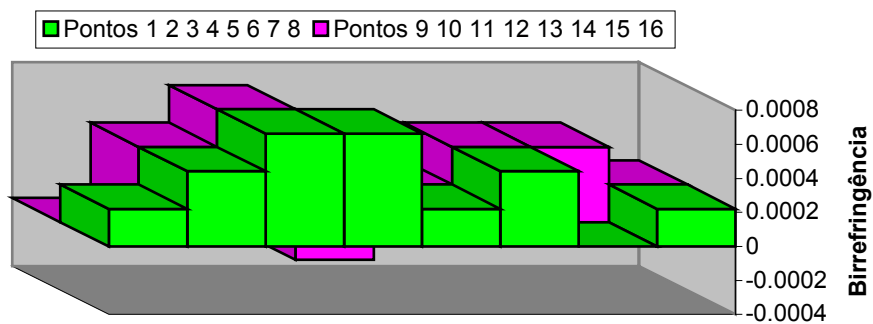


Fig. 38. Distribuição da birrefringência acústica no CP tração.

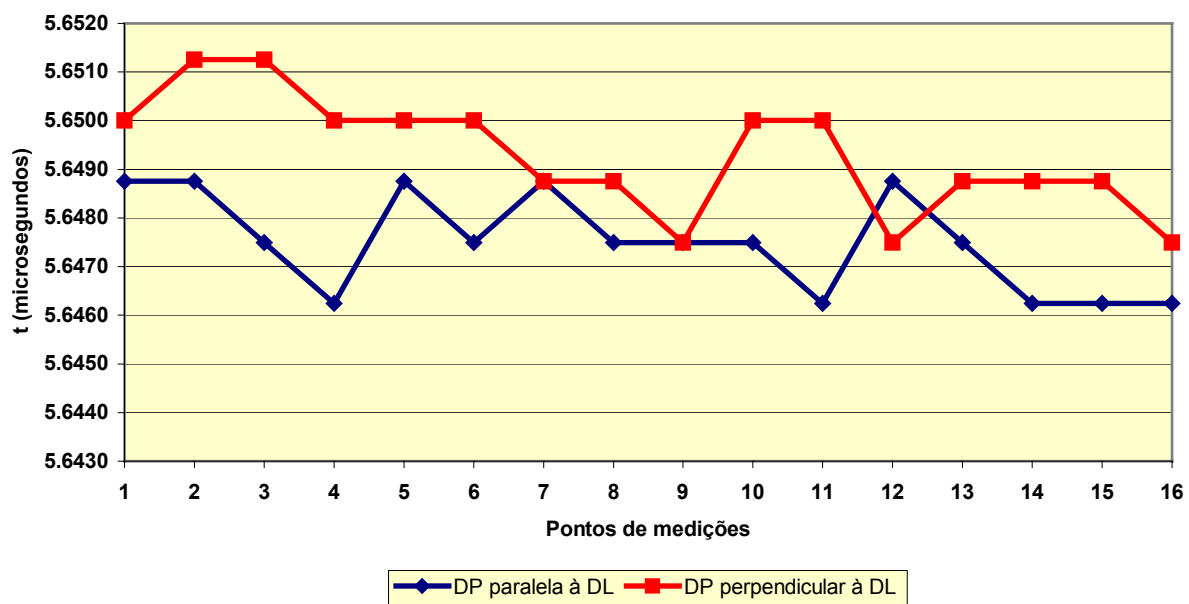


Fig. 39. Tempo de percurso da onda ultra-sônica para os pontos medidos no CP tração, com a DP paralela e perpendicular à DL.



#### **4.3.2. Análise da birrefringência das chapas de aço ABNT 1012 (antes da soldagem)**

Os pontos onde foram feitas as medidas para a análise da birrefringência das chapas antes de serem soldadas são os mesmos selecionados para a determinação da direção de laminação deste material (fig. 31). Foram realizadas da mesma maneira que para o CP de tração.

Os resultados da análise da birrefringência das chapas 1 e 2, antes de serem soldadas estão mostrados nas figs. 40 e 41.

Através do gráfico de barras das chapas 1 e 2 antes de serem soldadas, observa-se que ambas apresentam uma birrefringência acústica inicial (**Bo**) não uniforme. A chapa 1 em vários pontos apresentou uma birrefringência negativa, significando que nesta região o tempo de percurso da onda polarizada paralelamente à DL apresentou um tempo de percurso maior do que o tempo com a DP perpendicular à DL. Na chapa 2 isto não ocorreu, comportamento este não explicável, já que os dois CPs foram retirados de uma mesma chapa, significando então que o método é muito sensível a procedimentos prévios de preparação da chapa (usinagem, tratamentos térmicos, etc).

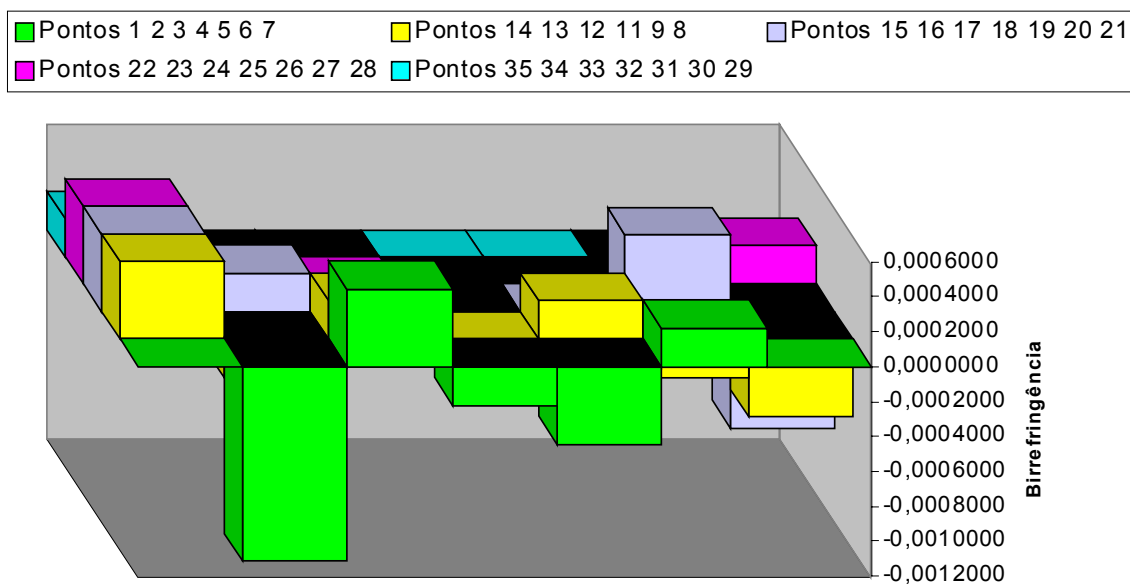


Fig. 40. Distribuição da birrefringência na chapa 1 antes de ser soldada.

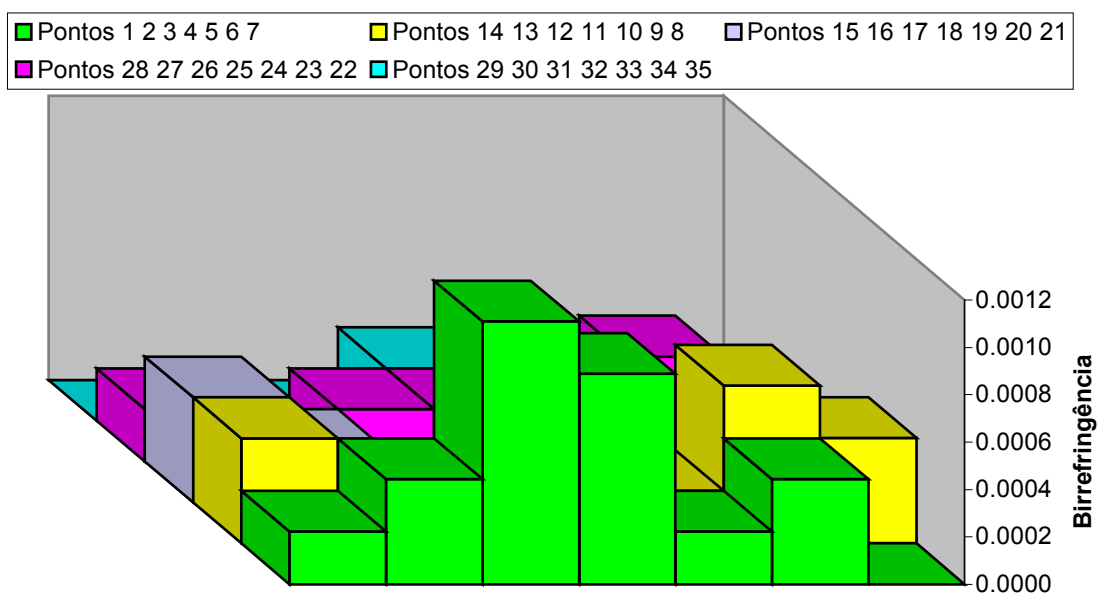


Fig. 41. Distribuição da birrefringência na chapa 2 antes de ser soldada.

#### **4.3.3. Análise da birrefringência das chapas de aço ABNT 1012 (após a soldagem)**

Após a soldagem a velocidade da onda ultra-sônica foi novamente avaliada nos mesmos pontos das chapas para que fossem calculadas as alterações na birrefringência originadas pelo processo de soldagem. O procedimento do ensaio encontra-se no item 3.4 do capítulo anterior.

As figuras 42 e 43 mostram a distribuição da birrefringência das chapas 1 e 2 após a soldagem e as figs. 44 e 45 os tempos de percurso da onda nas 2 (duas) direções de polarização para as chapas 1 e 2 respectivamente.

Após a soldagem as chapas mostram uma distribuição da birrefringência onde além da anisotropia inicial da chapa, adiciona-se ainda a anisotropia causada pelas tensões originadas no processo de soldagem. A variação da birrefringência não é homogênea. Possivelmente se as chapas tivessem sido tratadas termicamente antes da soldagem para que as tensões iniciais fossem aliviadas e o material apresentasse uma anisotropia acústica uniforme, teria sido possível observar melhor a influência das tensões residuais oriundas da soldagem na birrefringência ao longo da chapa.

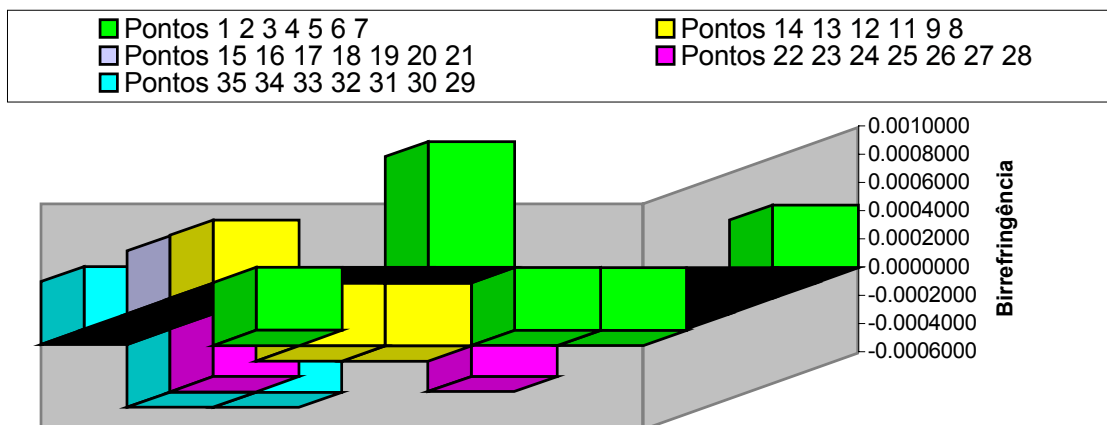


Fig. 42. Distribuição da birrefringência na chapa 1 (aço ABNT 1012) após soldagem.

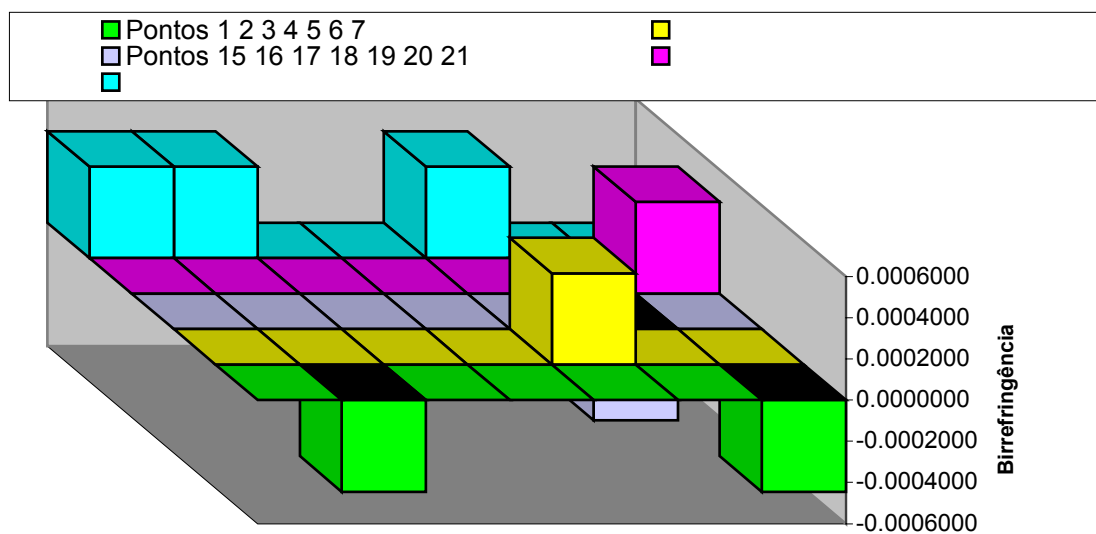


Fig. 43. Distribuição da birrefringência na chapa 2 (aço ABNT 1012) após soldagem.

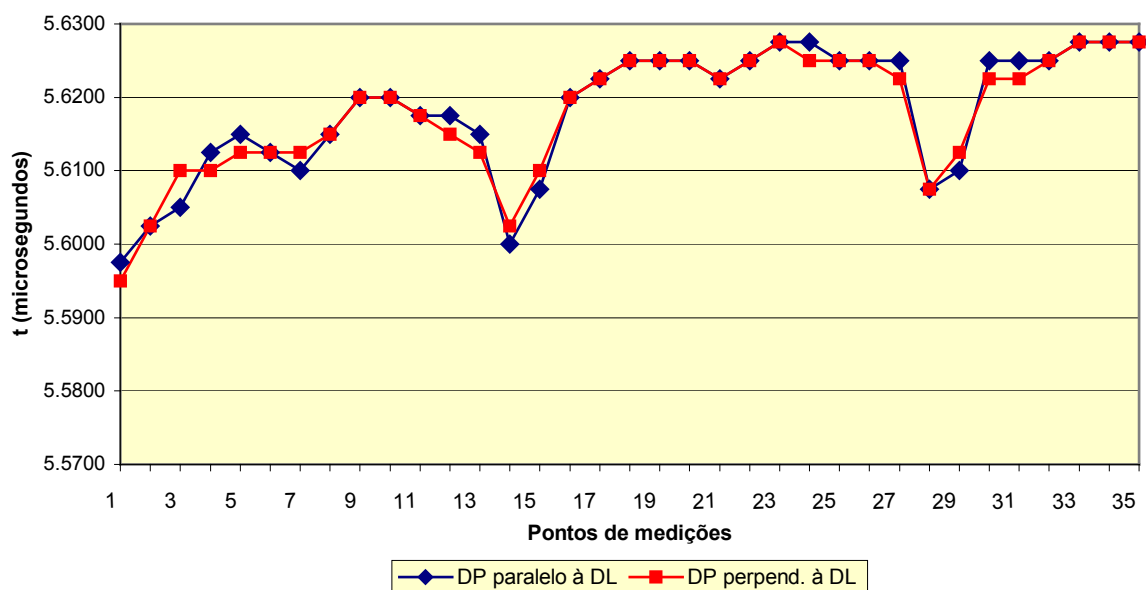


Fig. 44 .Tempo de percurso da onda ultra-sônica para a chapa 1 após a soldagem, com a DP paralela e perpendicular à DL.

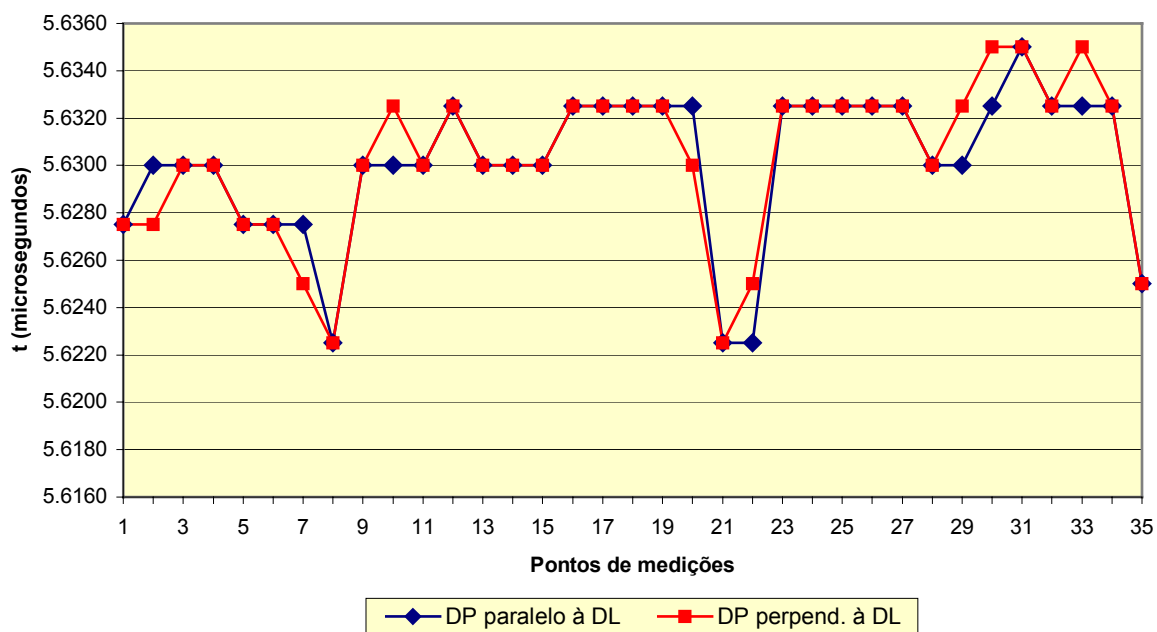


Fig. 45 .Tempo de percurso da onda ultra-sônica para a chapa 2 após a soldagem, com a DP paralela e perpendicular à DL.

#### 4.4. Determinação da constante acustoelástica do material

A fig. 46 mostra a variação do tempo de percurso da onda com a tensão aplicada, para as condições: transdutor com a DP paralela à direção de aplicação da carga (DAC), transdutor com a DP fazendo 90° com a direção de aplicação da carga (DAC).

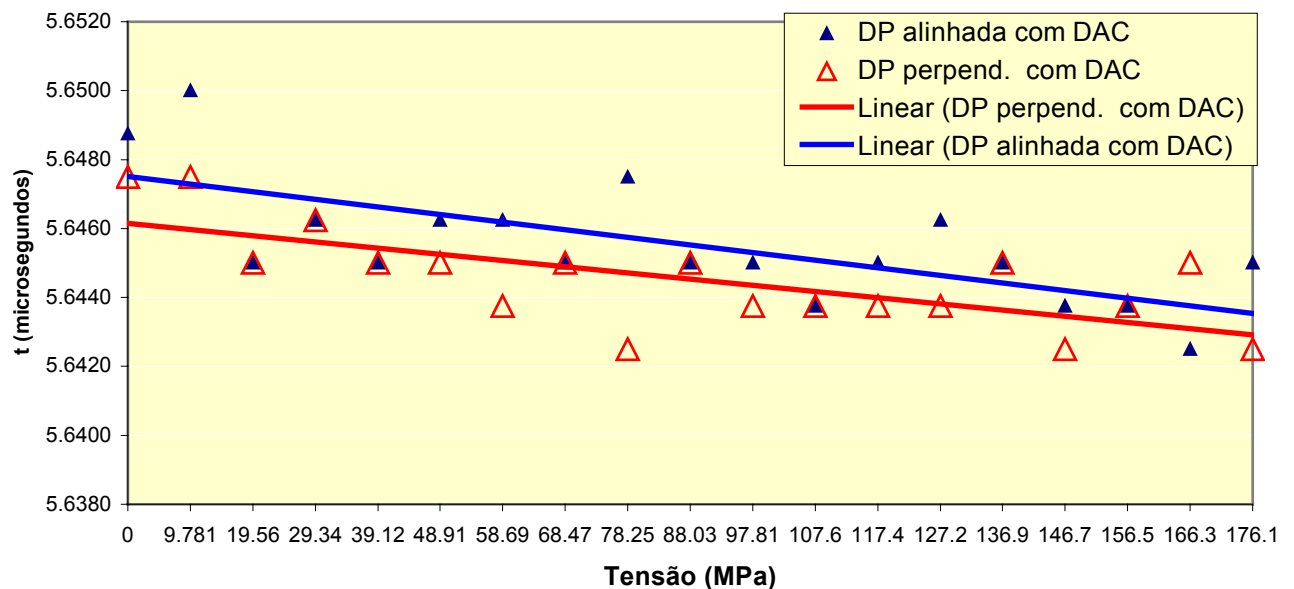


Fig. 46. Variação do tempo de percurso da onda ultra-sônica versus a tensão aplicada (aço ABNT 1012).

Pelo gráfico conclui-se que, mesmo para o material sem carregamento os valores de tempo nas duas direções de polarização foram diferentes indicando uma anisotropia inicial no material, causada pela textura, ou por alguma tensão interna que o material já possuísse. Também se nota que, quando a DP do transdutor está alinhada com a DAC, o tempo de percurso da onda ultra-sônica ao longo da espessura do CP tende a diminuir com um aumento da carga aplicada

(aumento da velocidade), o mesmo ocorre quando a DP está perpendicular à DAC, comportamento este diferente do esperado.

Segundo Tanala e outros [1994], no caso de ondas cisalhantes polarizadas, uma mudança na velocidade da onda devido ao aumento da carga aplicada, ocorre somente quando a direção de polarização é perpendicular à DAC. Bittencourt [2000] obteve para o aço um aumento da velocidade da onda quando esta estava polarizada transversalmente à DAC e uma diminuição quando a onda estava polarizada na direção longitudinal. Portanto, os resultados obtidos na prática divergem para os dois autores.

Inicialmente supôs-se que a diferença no comportamento da onda obtido neste trabalho poderia ser atribuído à pouca solicitação do CP, já que não foi possível uma redução na sua seção transversal, pois, em vista do material apresentar um grau de laminação variável ao longo da espessura procurou-se manter esta igual à da chapa a ser soldada para que, a constante acustoelástica fosse realmente representativa do material a ser soldado. Embora recomenda-se para este ensaio uma carga que alcance até 90% da carga de escoamento, no caso presente utilizou-se em torno de 54%. Um aumento da carga não foi possível devido à limitação da capacidade do equipamento de ensaio de tração (9,0 ton).

Com o intuito de se suprir estas dúvidas o ensaio foi refeito usinando-se um outro corpo de prova de aço carbono 1012 porém, com diferente textura, e menor seção transversal para que o material fosse mais solicitado, porém o resultado obtido foi similar ao da figura 46.

Calculando-se a birrefringência a partir das medidas de tempo para as duas direções mostradas na fig. 46 obteve-se uma nova reta cujo coeficiente angular é a constante acustoelástica

(m) do material. O valor da constante é  $-7 \times 10^{-6}$  conforme pode-se observar na fig. 47. Esta constante é utilizada nos cálculos da distribuição de tensão da chapa soldada.

A reta foi traçada utilizando-se dos recursos do programa Excel, com a opção de gráfico tipo tendência linear o qual ajusta a linha usando o método dos mínimos quadrados. Os valores da birrefringência da chapa mostraram uma tendência linear com o aumento da carga aplicada, porém, nota-se que esta tendência não é nítida. A princípio se supôs que a dispersão era devido à imprecisões nas medidas, variação no ângulo de polarização em relação à direção de aplicação da carga ou acoplamento deficiente do transdutor no corpo de prova. Sendo assim, o ensaio foi refeito tomando-se os devidos cuidados, porém os resultados se repetiram.

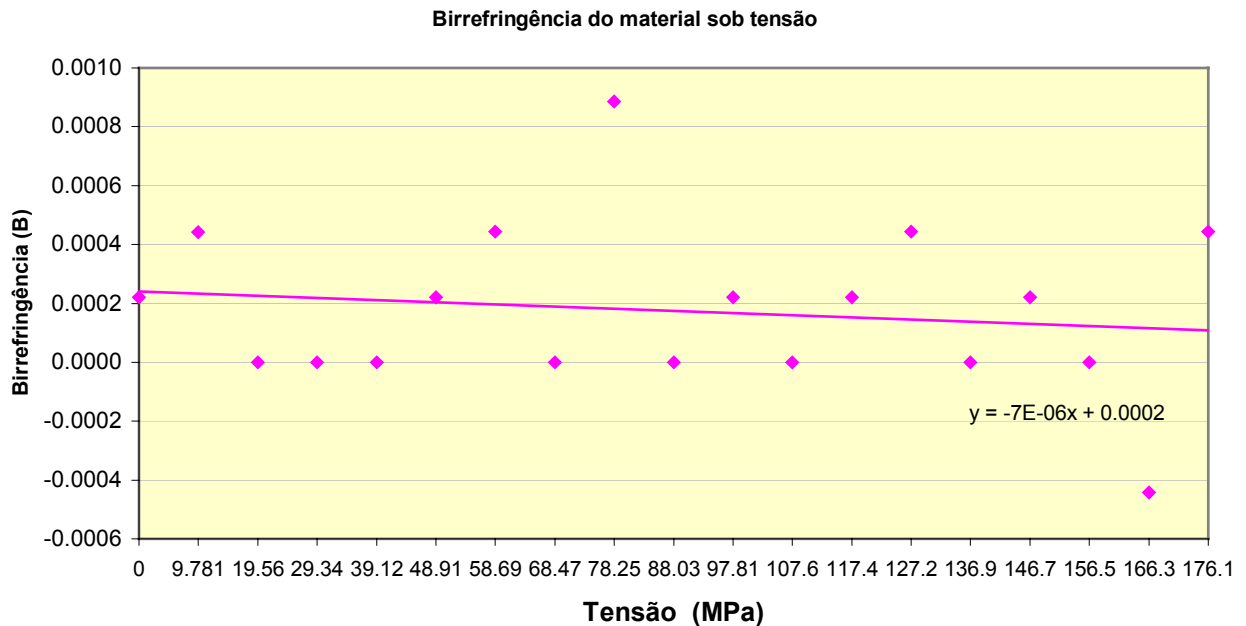


Fig. 47. Birrefringência acústica versus tensão.



#### 4.5. Determinação por ultra-som das tensões principais atuando na chapa soldada

Para um melhor entendimento dos gráficos de tensão, a fig. 48 mostra as posições e distribuição dos pontos para os quais traçaram-se as curvas da distribuição de tensões (quadrículas em azul).

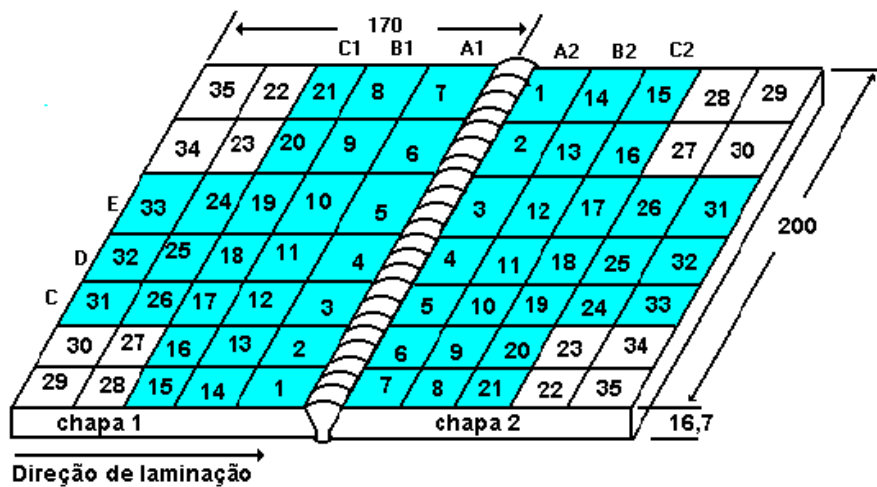


Fig. 48. Distribuição dos pontos e das posições das curvas de perfil de tensões na chapa soldada.

Traçaram-se 3 (três) curvas de distribuição de tensões transversalmente ao cordão de solda, isto é, para as linhas C, D e E. Longitudinalmente, foram traçadas 3 (três) curvas para cada lado do cordão, para as linhas A1, B1, C1, A2, B2 e C2, sendo que as linhas A1 e A2 encontram-se a uma distância aproximadamente de 30 mm do centro do cordão de solda, B1 e B2 a 60 mm e C1 e C2 a 90 mm.

Para a avaliação das tensões residuais ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) aplicou-se, para simplificar, a equação da birrefringência considerando nulas as tensões cisalhantes, sendo assim, utilizou-se equação 27.

A fig. 49 mostra os perfis de distribuição de tensões transversalmente ao cordão de solda para as linhas C, D e E da chapa. O eixo horizontal corresponde às distâncias em relação ao centro do cordão, e o eixo vertical à diferença entre as tensões principais ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) atuando em cada ponto.

Para uma melhor visualização da distribuição de tensões transversalmente ao cordão de solda, traçou-se um gráfico em 3 (três) dimensões, mostrando o perfil desta distribuição para todas as posições de medidas na chapa (fig. 50).

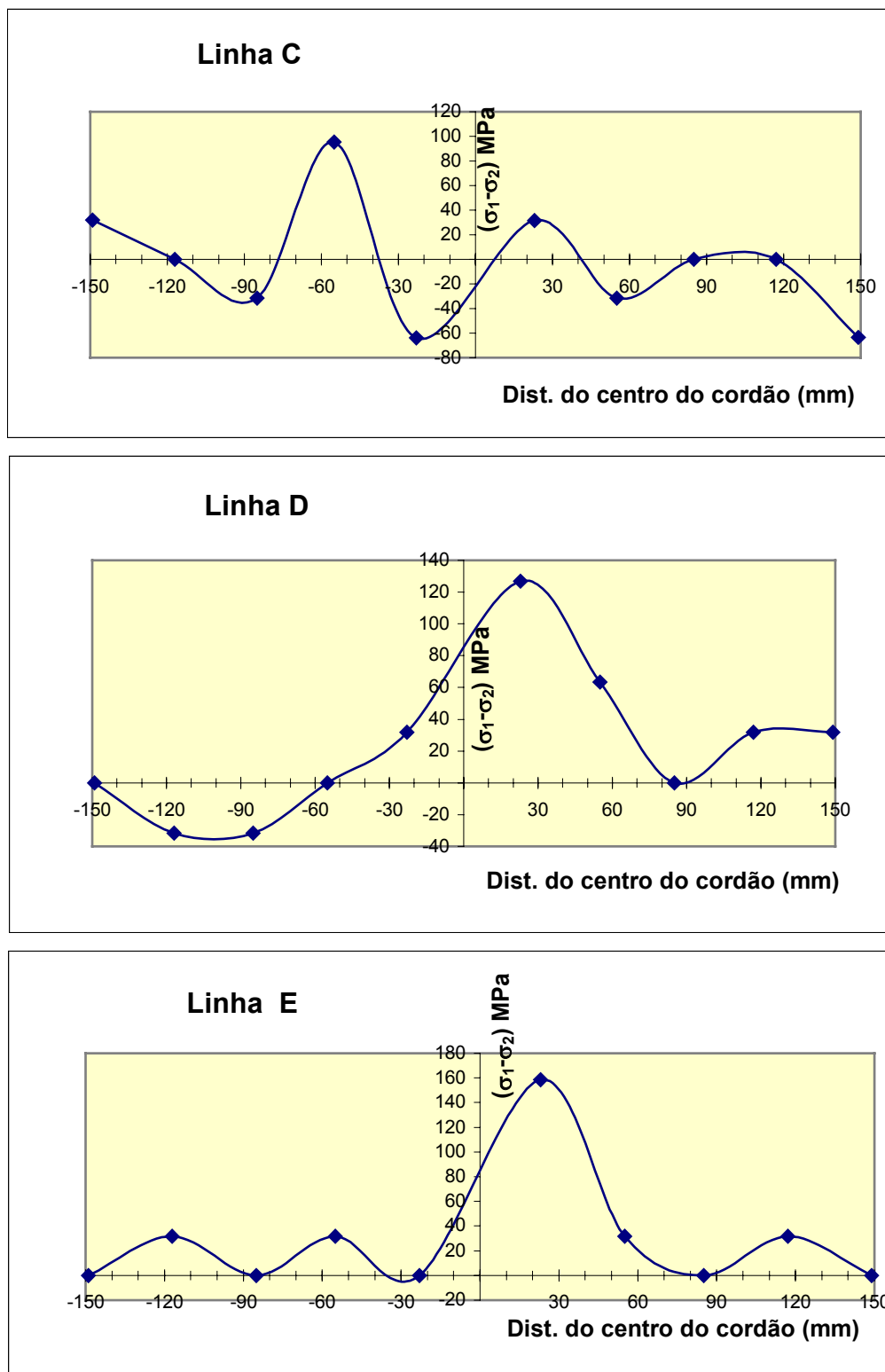


Fig. 49. Perfis de distribuição de tensões perpendicularmente ao cordão de solda pela técnica da birrefringência.

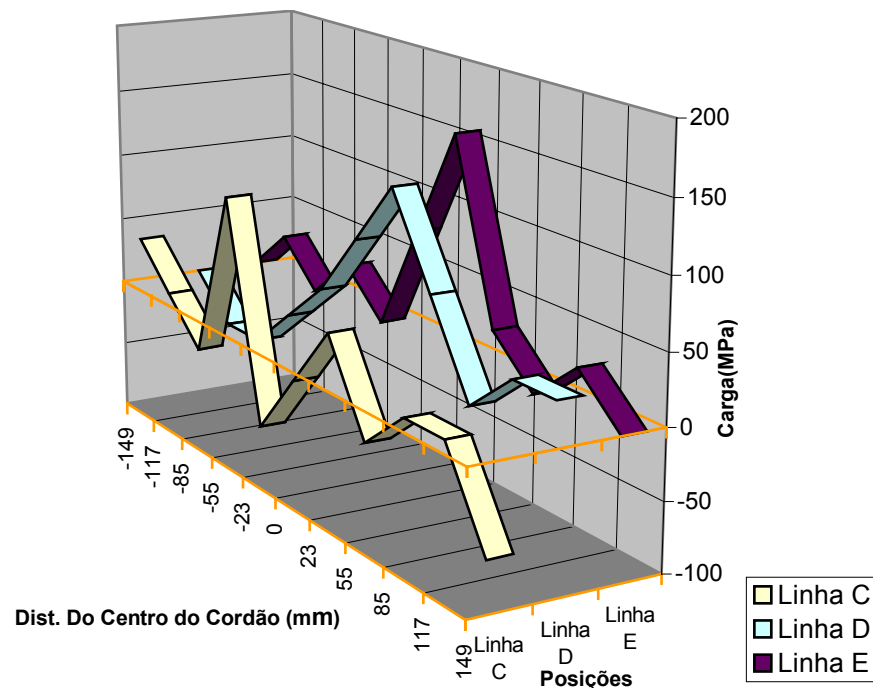


Fig. 50. Distribuição tridimensional de tensões na chapa transversalmente ao cordão de solda.

Nota-se que para as linhas D e E, na região próxima ao cordão, as tensões são tratativas, à medida que se distancia do cordão as tensões tendem a diminuir tornando-se compressivas em alguns pontos. Para a linha C a distribuição de tensões não foi conforme o esperado já que na região da solda e ZAC as tensões atuantes são compressivas, porém, devido às várias fontes de tensões que ocorrem durante a soldagem, conforme Silveira e Barros [1983], esta superposição pode gerar uma distribuição de tensão bastante complexa.

Vale lembrar também que, na região do cordão e na zona afetada pelo calor (ZAC) não foram efetuadas medidas, portanto os valores do gráfico foram obtidos pelo ajuste da curva. A falta de simetria na distribuição de tensões transversais para os dois lados do cordão, poderia ser justificada pelos ciclos térmicos resultantes da sequência alternada de passes durante a soldagem.

A macrografia da fig.51 indica o posicionamento dos cordões não totalmente simétricos. Cabe ainda ressaltar que as duas chapas a serem unidas apresentaram grandes diferenças com relação à birrefringência acústica antes de serem soldadas.

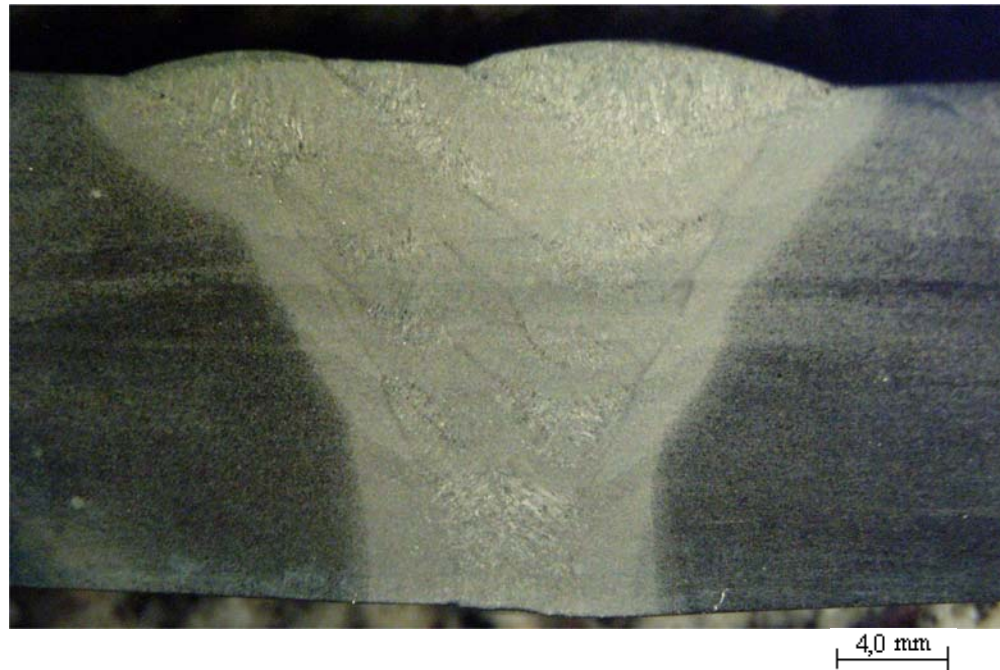


Fig. 51. Metalografia da junta mostrando a sequência de passes de solda.

As figs. 52 e 53 mostram os resultados dos perfis de distribuição de tensões longitudinalmente ao cordão de solda para várias posições da chapa. O eixo horizontal corresponde às distâncias em relação à extremidade da chapa (bordo de início da soldagem), e o eixo vertical à diferença entre as tensões principais atuando em cada ponto.

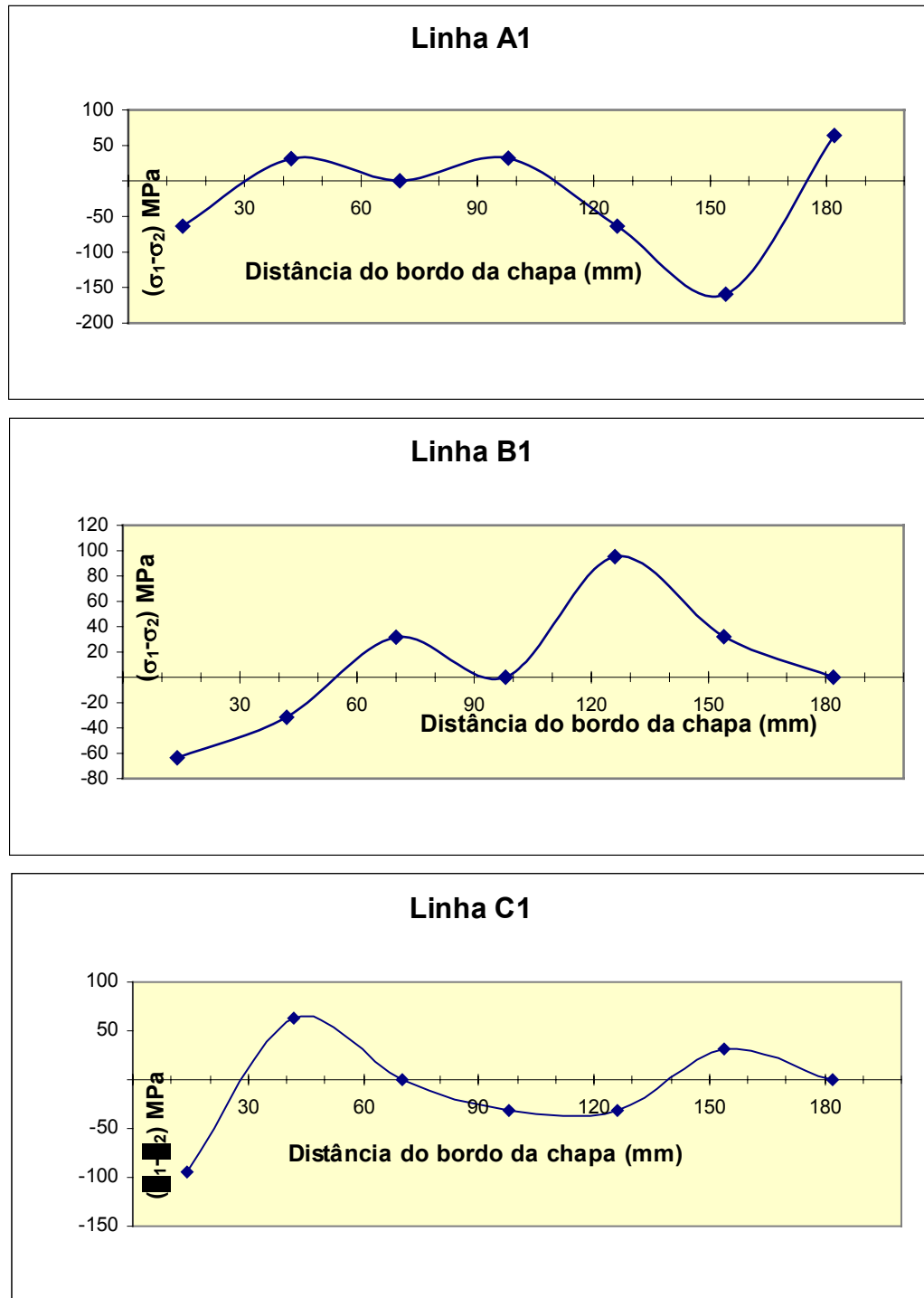


Fig. 52. Perfis de distribuição de tensões longitudinalmente ao cordão de solda pela técnica da birrefringência, para as linhas A1, B1 e C1 (fig. 48).

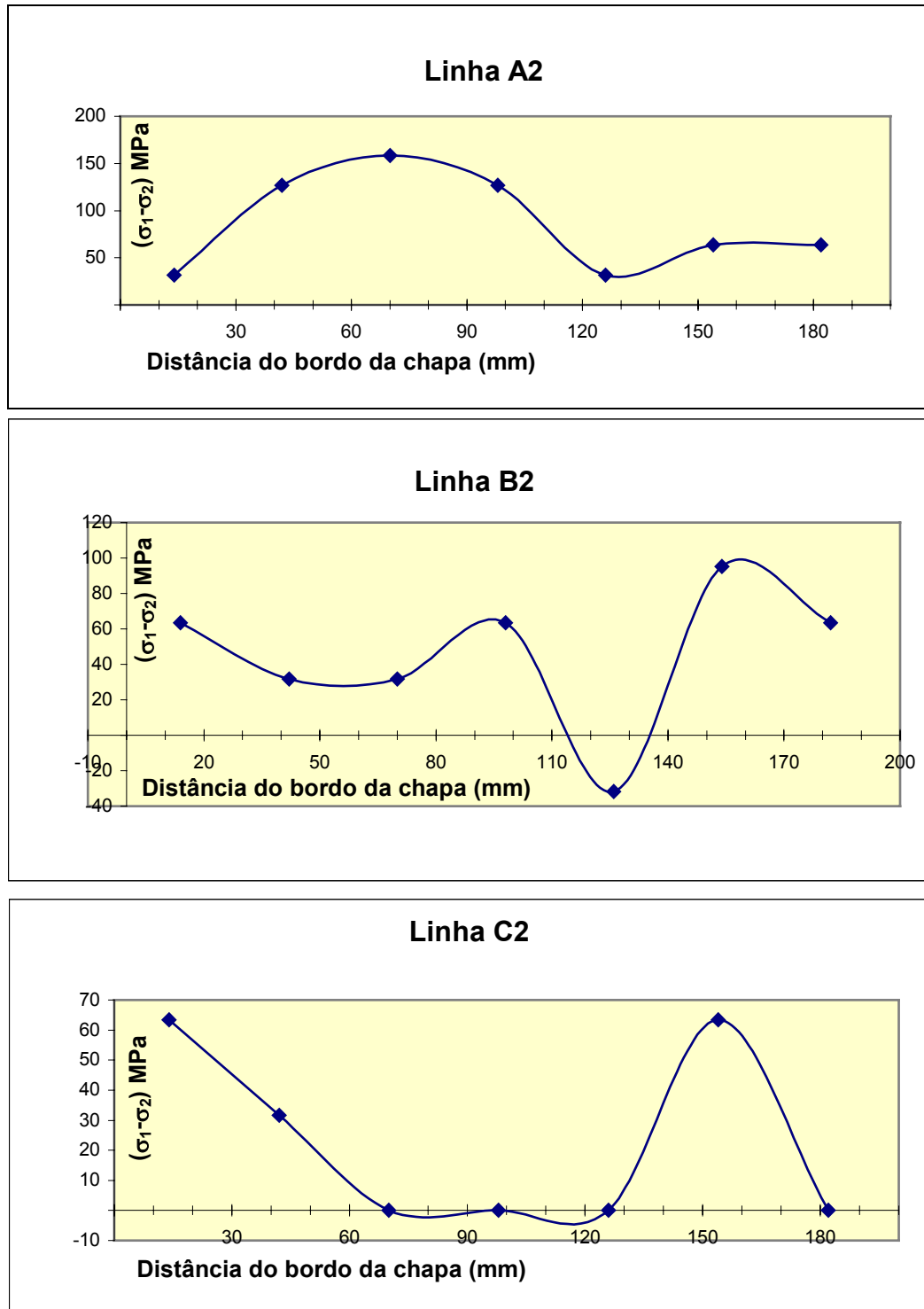


Fig. 53. Perfis de distribuição de tensões longitudinalmente ao cordão de solda pela técnica da birrefringência, para as linhas A2, B2 e C2 (fig. 48).

A representação tridimensional das figs. 54 e 55 possibilita uma melhor visualização da distribuição de tensões longitudinalmente ao cordão de solda, mostrando o perfil desta tensão para 3 (três) linhas paralelas ao cordão de solda, respectivamente, nas chapas 1 (A1, B1 e C1) e 2 (A2, B2 e C2).

Observa-se pelos gráficos que para a posição A2 não houve tensão compressiva, aliás para este lado do cordão as tensões atuantes são exclusivamente trativas. A distribuição de tensões paralelamente ao cordão de solda, não é a mesma para as duas chapas, isto pode ser atribuído a um comportamento diferente com relação à birrefringência e também a uma distribuição de passes de solda desigual. Aparentemente o último passe, posição à direita do eixo da solda (fig. 51), seria responsável pelas tensões trativas mais altas segundo a linha A2.

Deve-se acrescentar também que, como as linhas onde se fez as medidas longitudinais não coincidem com eixo central da solda, e sim, são paralelas a ele, então, o eixo de simetria do material não coincide com a direção das tensões principais, portanto as medidas de tensão podem apresentar um desvio em relação ao valor real devido à equação usada (equ. 27) ser adequada para quando as tensões principais coincidem com o eixo de simetria do material



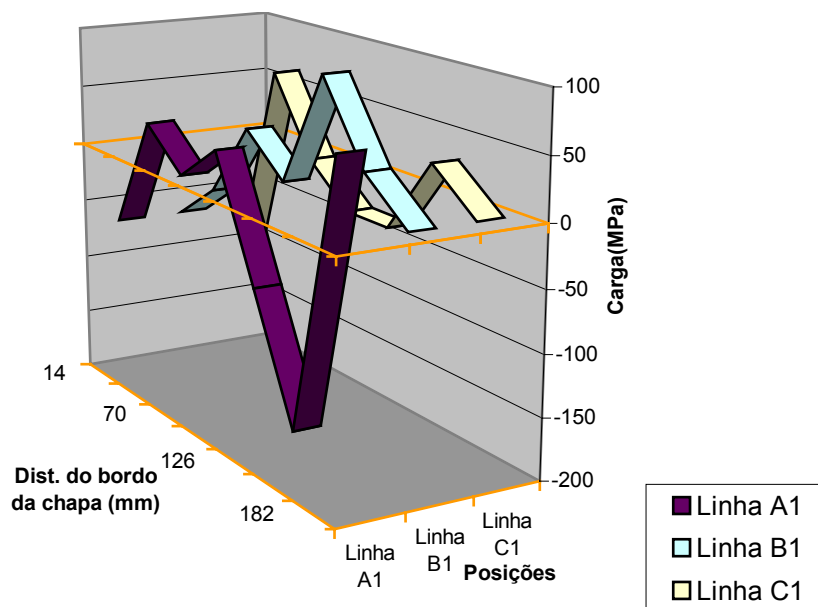


Fig. 54. Distribuição tridimensional de tensões longitudinalmente ao de cordão solda, para as linhas A1, B1 e C1 (chapa 1).

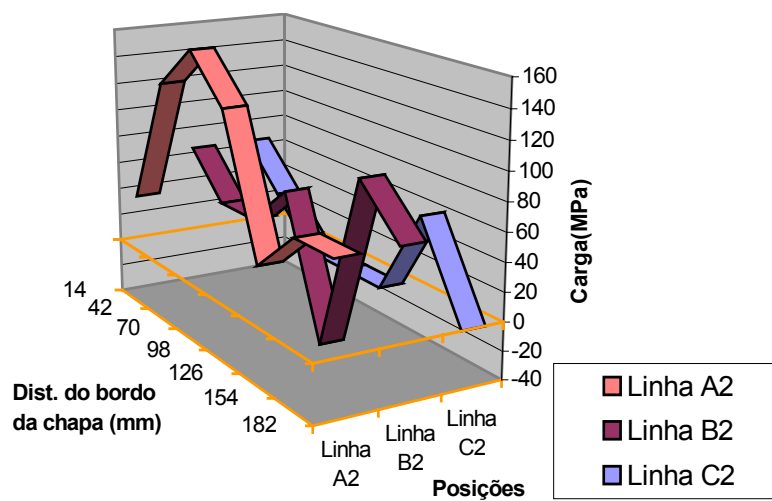


Fig. 55. Distribuição tridimensional de tensões longitudinalmente ao cordão de solda, para as linhas A2, B2 e C2 (chapa 2).

#### **4.6. Determinação das tensões principais na peça soldada pelo método do furo com extensômetros**

Além da análise das tensões residuais por ultra-som da chapa soldada, usando-se a técnica da birrefringência, foi realizado um ensaio utilizando-se do método do furo com extensômetros, com o intuito de obter algum parâmetro de comparação.

Fez-se o estudo somente para uma sequência de pontos transversalmente ao cordão de solda, perfazendo um total de 8 (oito) pontos, 4 (quatro) para cada lado do cordão, o que equivale à linha D na figura de distribuição de pontos ao longo da chapa soldada (fig. 48). Foram usinados na superfície da chapa 8 (oito) furos com diâmetro de 1,9 mm, sendo as rosetas posicionadas com um diâmetro de 5,13 mm ao redor do furo. A profundidade dos furos foi de aproximadamente 2,0 mm. As tensões  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  são as tensões máximas e mínimas agindo nos eixos das direções principais de simetria para cada ponto. A tabela 2 mostra o valor destas tensões, bem como o ângulo ( $\beta$ ) formado (sentido horário) entre a tensão máxima ( $\sigma_1$ ) e a linha paralela ao cordão de solda.

A diferença entre as tensões principais ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) para os pontos medidos estão no gráfico da fig. 56. Na região da chapa que compõe a solda e ZAC (zona afetada pelo calor), não foram realizadas medidas, o furo mais próximo encontrava-se a aproximadamente 25 mm do centro do cordão, portanto, os valores entre o primeiro ponto à esquerda e à direita da solda, constituem-se em uma interpolação.

Tabela 2. Tensões máximas e mínimas nos pontos de medições das tensões principais.

Pontos	$\beta^\circ$ (Âng. das tensões principais)	$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_2$ (MPa)
1	-83	59	-11
2	-68	106	16
3	-71	155	28
4	76	153	37
5	63	243	199
6	88	277	80
7	82	209	94
8	-89	260	178

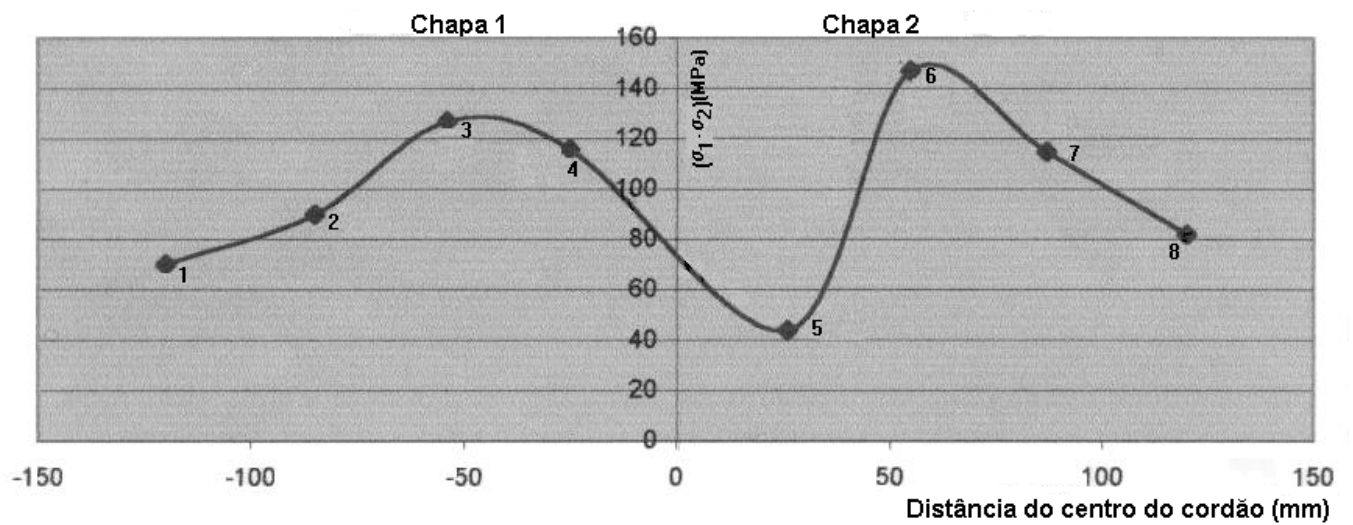


Fig. 56. Distribuição transversal dos pontos de medições da tensão residual com extensômetros e valor da diferença entre as tensões ao longo da linha D.

Para uma melhor avaliação das tensões obtidas por esta técnica fez-se em um mesmo gráfico a distribuição das tensões  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  bem como sua diferença, para os pontos medidos (fig. 57). A curva ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) corresponde ao gráfico mostrado na fig. 56.

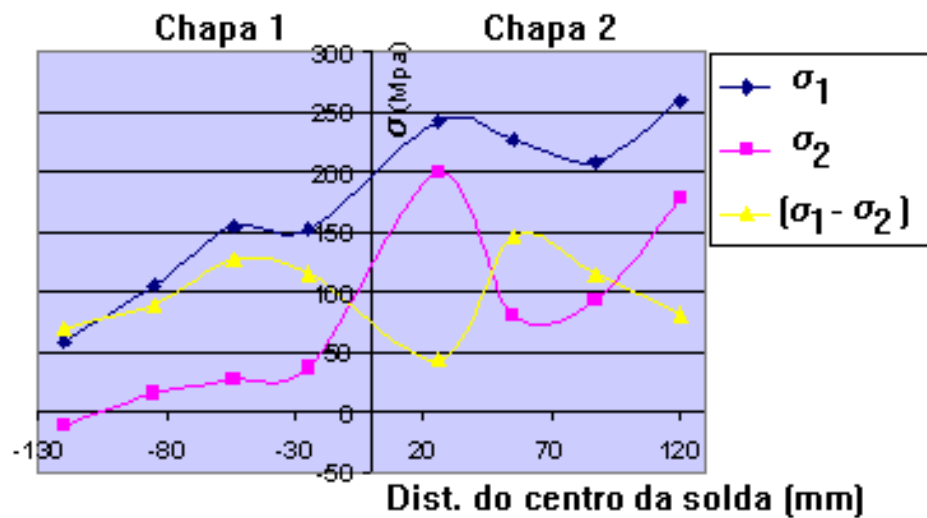


Fig. 57. Distribuição de tensões transversais nos eixos principais de tensões.

(Técnica do furo cego).

Analisando-se as curvas de distribuição de tensões transversalmente ao cordão de solda, obtidas pelos dois métodos (fig. 58), observou-se algumas coincidências e disparidades entre os resultados. Comparando-se a curva correspondente à posição D, para as duas técnicas, nota-se:

- Tensões compressivas só foram observadas na chapa 1.
- Na chapa 2 se observou apenas tensões trativas.
- O valor máximo de ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) foi bastante próximo (140 e 120 MPa, respectivamente para furo cego e ultra-som).
- O ponto de máximo ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) ocorreu na chapa 2.

As disparidades podem ser atribuídas a algumas particularidades que compõem cada método. Com a técnica do furo cego, as medidas de tensões são realizadas próximas à superfície da chapa, enquanto que, com a técnica ultra-sônica as medidas são realizadas em todo o volume de material que é varrido pelo feixe sônico, isto é, em toda a espessura da chapa, sendo assim, o resultado neste caso é uma média das tensões no volume de material. Além disso a equação simplificada da birrefringência (equ. 27), adotada neste trabalho, é adequada para a condição em que as direções de simetria do material coincidem com as direções das tensões principais, se isto não ocorre os valores calculados podem apresentar uma distorção em relação ao valor real.

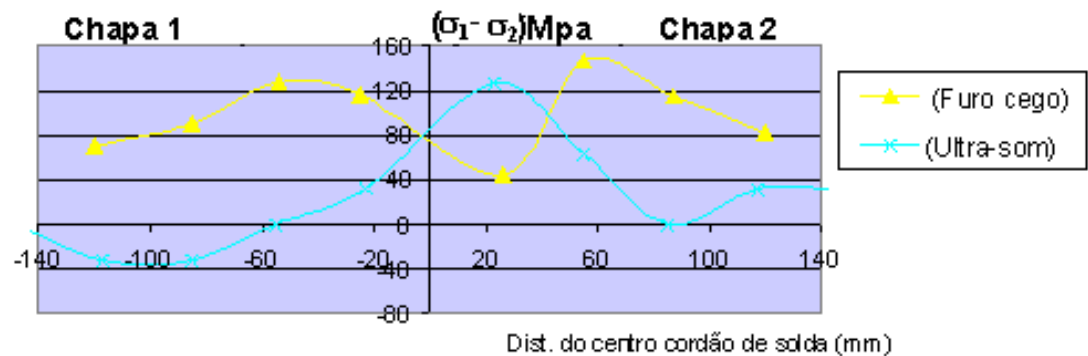


Fig. 58. Distribuição transversal de tensão pela técnica do furo cego e ultra-som.

## 5. Conclusões finais

1) Os resultados da aplicação da bancada experimental para análise ultra-sônica, indicaram a possibilidade de usar a técnica da birrefringência acústica para determinar a textura e o estado de tensões de chapas de aço.

2) A viabilidade prática do método ultra-sônico exige equipamentos de medição de alta precisão e resolução, pois a anisotropia acústica devido à tensão e textura do material está associada a diferenças de tempos de percurso da onda ultra-sônica da ordem de nanosegundos. O desenvolvimento dos programas de aquisição de dados e processamento de sinais (MATLAB) foi fundamental para se obter a resolução necessária ao ensaio, tanto na aquisição como no processamento dos sinais. Conseguiu-se uma taxa de amostragem de  $1 \times 10^9$  amostras/segundo com uma resolução de 1ns.

3) Na aplicação da técnica ultra-sônica com ondas cisalhantes para avaliar as tensões residuais de soldagem, é importante que se faça uma análise estatística mais aprofundada, principalmente com relação às incertezas dos resultados. Além disso o seu uso na prática impõe requisitos e traz dificuldades relevantes tais como:

a) A determinação da constante acustoelástica, que exige uma amostra do material base similar ao que será soldado, é demorada e dispendiosa pois requer tempo e custo elevado para a preparação dos corpos de prova, ensaio de tração e numerosas medidas com ultra-som.

b) É importante que as faces das chapas a serem soldadas sejam usinadas para melhorar o acoplamento transdutor-peça. Porém, a sobre-espessura a ser retirada em cada face da chapa a ser soldada deve ser a mesma do corpo de prova para o levantamento do coeficiente acustoelástico, pois observou-se no ensaio metalográfico que a direção de laminação próximo à face da chapa pode não estar tão definida quanto no centro da chapa, portanto, se o desbaste não for feito da mesma maneira nos dois corpos de prova o coeficiente acustoelástico determinado, não estará representando um material com a mesma microestrutura.

c) Como os resultados dependem da birrefringência, ou seja, história prévia da peça (corte, usinagem, tratamento térmico, etc) é muito importante o conhecimento da origem da chapa que está sendo analisada. Estes dados auxiliarão na interpretação dos resultados obtidos nos testes da birrefringência, determinação da textura e tensões.

## **6. Sugestões para trabalhos futuros**

A análise de tensões residuais por ultra-som embora esteja sendo estudada em centros de pesquisas de vários países (França, Alemanha, USA, etc), no Brasil está ainda em fase inicial. Apenas alguns pesquisadores do Instituto de Energia nuclear (IEN), Universidade de Campinas (UNICAMP) e Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) têm se dedicado ao assunto. Observa-se pela dificuldade em encontrar material bibliográfico, que a técnica tem sido pouco explorada. Isto significa que existe um campo ainda bastante vasto para se pesquisar. No campo da soldagem esta técnica é muito importante para a determinação das tensões remanescentes do processo de soldagem, principalmente por não se ter que danificar o material em análise e também permitir que os ensaios sejam realizados em campo.

Como todas as técnicas, apresenta suas vantagens e limitações. É importante que se faça um estudo para avaliar em quais situações seria mais conveniente a aplicação desta técnica e não de outras também já conhecidas.

Como sugestão de trabalhos futuros poder-se-ia citar:

- Estudo sistemático da análise da textura por ultra-som para aços com diferente graus de laminação, aumentando-se o número de medições para cada posição e direção de polarização do transdutor, reduzindo-se assim as incertezas do método.

- Determinação da constante acustoelástica com transdutor de ondas cisalhantes de incidência normal com um dispositivo para fixação deste no corpo de prova durante o ensaio, o



qual permitisse um giro de  $90^\circ$  em relação à direção de aplicação da carga, de maneira a serem eliminados erros decorrentes do alinhamento com o corpo de prova e também do acoplamento transdutor peça.

- Aplicação da técnica ultra-sônica na determinação de tensões residuais decorrentes da soldagem, para outros materiais, tais como, alumínio, aço inoxidável, etc.

- Utilização da técnica ultra-sônica com transdutores piezoelétricos de diferentes frequências, para se avaliar sua influência com relação à resolução na medida da velocidade da onda.

- Realização de aquisições de sinais ultra-sônicos, mantendo-se constante a pressão de contato no acoplamento transdutor-peça, para se avaliar a influência desta pressão na velocidade da onda. Isto poderia ser realizado utilizando-se de um robô para fazer este acoplamento.

- Utilização da técnica ultra-sônica para se avaliar o alívio de tensões em materiais tratados termicamente. Não apenas para o aço, como também para outros materiais, soldados e não-soldados.

## 7. Referências Bibliográficas

- [1] Allen, D. R.; Sayers, C. M.. The Measurement of Residual Stress in Textured Steel Using an Ultrasonic Velocity Combinations Technique. Ultrasonics 22, July/ 1984, pp. 179-187.
  
- [2] Allen, D. R.. Comparisons Between Ultrasonic Bulk Shear Wave Velocities in Textured Steel with Application to the Measurement of Residual Stress. Materials Physics & Metallurgy Division. AERE Harwell, Oxfordshire /January/ 1985, pp. 1-14.
  
- [3] Bach, F.; Askegaard, V.. General Stress-Velocity Expressions in Acoustoelasticity. Experimental Mechanics Vol 19, n °2 Feb./ 1979, pp. 69-75.
  
- [4] Bensom, R. W.; Raelson, V. J.. “ Acoustoelasticity”, Product Engineering/ Vol. 30/ July/ 1959 pp. 56-59.
  
- [5] Bittencourt, M. S. Q; Lamy, C. A.; Payão, J. C. F.. Determinação da Direção de Laminação de Aços e Ligas de Alumínio por Ultra-Som. Soldagem & Inspeção ano 4/ n °3/1998, pp. 12-16.
  
- [6] Bittencourt, M. S. Q; Lamy, C. A.; Payão, J. C. F.. Um Estudo Preliminar do Comportamento de Ondas Ultra-sônicas em um Material sob Tensão. COPPE/UFRJ/IEN/1998, pp. 1-11.
  
- [7] Bittencourt, M. S. Q.; Lamy, C. A.; Payão, J. C. F.. Potencialidades da Técnica Ultra-Sônica. Soldagem & Inspeção ano 4/ n °12/ 1998, pp. 1-11.

- [8] Bittencourt, M. S. Q.. Desenvolvimento de um Sistema de Medida de Tempo Decorrido da Onda Ultra-sônica e Análise do Estado de Tensão em Materiais Metálicos pela Técnica da Birrefringência Acústica. Tese de D.Sc., COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro/ 2000.
- [9] Bray, D. E.; Stanley, R. K.. Nondestructive Evaluation a Tool in Design, Manufacturing on Service./ 1997, pp. 147-164.
- [10] Brignell, J.; White, N.. Intelligent Sensor Systems. JOP Publishing Ltd / 1996. pp. 115-121.
- [11] Clarck, A. V.; Mulder, J. C.; Trevisan, R. E.; Siewert, T. A.; Mignogna, R. B.. Ultrasonic Techniques for Residual Stress Measurement in Thin Welded Aluminum Alloy Plates. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. 5B/ 1995, pp. 1461-1472.
- [12] Crecraft, D. I.. The Measurement of Applied and Residual Stresses in Metals Using Ultrasonic Waves. Journal Sound Vib., 5 ( I )/ 1967, pp. 173-192.
- [13] Fisher, M. J.. Acouselastic Measurements of Elastic-Plastic and Residual Stresses. Proceedings of AMES/DARPA Conference/ Review of Progress in Quantitative NDE/ 1984, pp. 1051-1059.

- [14] Fisher, M. J.. Acoustelastic Measurements of Residual Stresses and Relaxation Phenomeno. International Conference on the Effects of Fabrication Related Stresses on Product Manufacture and Performance. / September/ 1987, pp. 163-182.
- [15] Hirao, M.; Fukuoka, H., Murakami, Y.. Resonance Acoustoelasticity Measurement of Stress in Thin Plates. Res. Nondestructive Evaluation./Springer Verlag/ 1992, pp. 127-138.
- [16] Hsu, N. N.. Acoustical Birefringence and the Use of Ultrasonic Waves for Experimental Stress Analysis. Experimental Mechanics Vol 14 n °5 May/ 1974, pp. 169-176.
- [17] Hughes, D. S.; Kelly, J. K.. Second Order Elastic Deformation of Solids. Physical Review/ Vol. 92/ n5/ 1953, pp. 1145-1149.
- [18] Iwashimizu, Y.; Kuobomura, K. Stress Induced Rotation of Polarization Direction of Elastic Waves in Slightly Anisotrophy Materials. Int. J. Solids Structures./Vol. 9/ 1973, pp. 99-114.
- [19] Johnson, G. C.. The Effect of Plastic Deformation on the Acoustoelastic Response of Metals. Journal of Applied Mechanics Division. March/ 1982, pp. 689-691.
- [20] Kobayashi, H.; Arai, Y.; Ohsawa, Y.; Nakamura, H.; Todoroki, A.. Nondestructive Measurement of Welding Residual Stresses by Acousto-Elastic Technique and Prediction of Fadigue Crack Growth. Journal of Pressure Vessel Technology. November/ 1992. Vol 114, pp. 417-421.

- [21] Kobayashi, A. S.. Handbook on Experimental Mechanics. Second Revision Edition. April/ 1993.
- [22] Li, A.; Ti, V.; Lebrun, J. L.; Ingelbert, G.. Surface Roughness Effects on Stress Determination by the X-Ray Diffraction Method. Experimental Techniques. March/April/ 1995. Vol. 19/ n °2.
- [23] Lu, Jian. Handbook of Measurement of Residual Stresses. Society for Experimentals Mechanics, Inc. / 1996.
- [24] Mac Donald, D. E.. On Determining Stress and Strain and Texture Using Ultrasonic Velocity Measurements. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics. Vol SU-28, N°2 . March/ 1981, pp. 75-79.
- [25] Masubuchi, K.. Analysis of Welded Structure. International Series on Materials and Technology /Vol. 33 / 1980, pp. 148-188.
- [26] Motta, M. S.; Lamy, A C.; Guimarães, A S.. A Utilização de Técnicas Ultra-Sônicas como Ferramenta Metalográfica: uma Revisão. Soldagem & Inspeção ano 5/ n °1, pp. 12-16
- [27] Pritchard, S. E.. The use of Ultrasonic for Residual Stress Analysis. NDT&E International. Vol 20/ n °1/1987, pp. 57-60.

- [28] Raj, B.; Jayakumar, T.. NDE Methodologies for Characterisation of Defects, Stresses and Microstructures in Pressure Vessels and Pipes. Published by Elsevier Science Ltd./ 1997, pp. 133-146.
- [29] Rodakoski, M. R.. Medição de Tensões Residuais com Holografia Eletrônica. Tese de doutorado da UFSC / outubro/1997.
- [30] Silveira, J. P.; Barros, S. M.. Tensões Residuais e Deformações em Soldagem. Apostila da Petrobrás /1983.
- [31] Schneider, E.; Höller P.; Goebbels, K.. Non Destructive and Analysis of Residual and Loading Stresses in Thick-Walled Components. Nuclear Engineering and Design. Vol 84/1985, pp. 165-170.
- [32] Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method. ASTM/ Designation: E 837/1995.
- [33] Szelazek, J.. Ultrasonic Measurement of Thermal Stress in Continuously Welded rails. NDT&E International. Vol 25/ n °2/1992, pp. 77-85.

[34] Tanala, E.; Bourse, G.; Fremiot, M.; Belleval de J. F.. Determination of Near Surface Residual Stresses on Welded Joints Using Ultrasonic Methods. NDT&E International. Vol 28/ n°2/ 1995, pp. 83-88.

[35] TDS Family Digitizing Oscilloscopes Programmer Manual. Tektronix/ July/ 1994.

## **Anexo A**

### **Correlação cruzada entre os sinais aqusitados**

Desenvolveu-se um método para o processamento do sinal utilizando um algoritmo de correlação cruzada, para permitir a precisão e resolução necessárias as medidas do tempo de percurso da onda ultra-sônica para a avaliação de tensão em materiais. A correlação cruzada foi usada para medir o tempo do sinal aqusitado no osciloscópio eliminando a necessidade da localização de um ponto de referência entre dois ecos consecutivos, o que é fonte de erros, seja por dificuldades de localização da referência ou pela falta de precisão na sua localização devido a existência de ruídos no sinal. Para solucionar estes problemas o programa baseou-se em dividir o sinal aqusitado, com dois ou mais ecos, de modo a gerar dois sinais, em parte idênticos. Um formado apenas pelo primeiro eco e o outro pelos dois ecos. O resultado da correlação cruzada entre esses dois sinais será, conceitualmente, o atraso entre eles. A defasagem entre os sinais, nesse caso, corresponde ao tempo de percurso que a onda ultra-sônica levou na sua propagação através da espessura do material.

Para separar o primeiro eco do sinal ultra-sônico é marcado no programa uma janela sobre este eco, através dos pontos correspondentes a este eco. O restante do sinal é anulado fazendo-se a média das amplitudes do sinal. A figura A1 mostra o resultado desta divisão do sinal ultra-sônico. A figura A1 (a) mostra o sinal inteiro, como aqusitado no programa, e a 1A (b) o resultado da separação do primeiro eco.



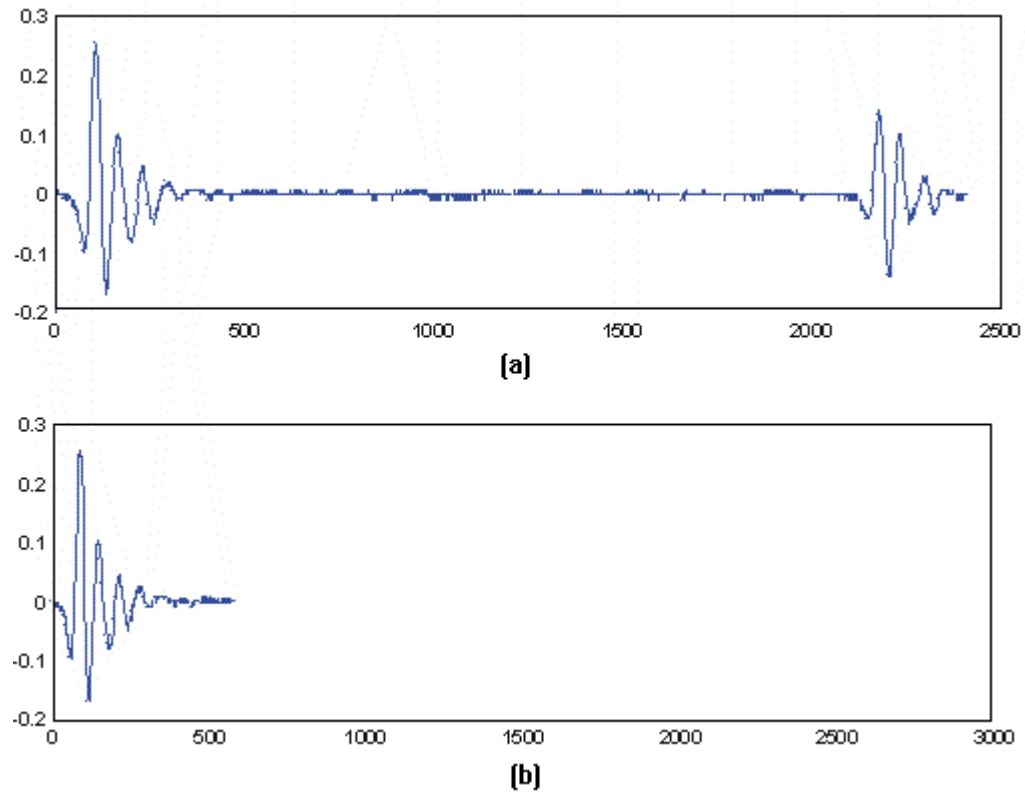


Fig. A.1 (a) Dois primeiros ecos do sinal ultra-sônico adquirido após a onda ultra-sônica ter percorrido a espessura da chapa de aço. (b) Primeiro eco do sinal anterior.

O sinal do primeiro eco é correlacionado com o sinal inteiro e o resultado da correlação cruzada, apresentado na figura A2, tem no seu ponto máximo o valor do tempo entre o primeiro eco e o subsequente. A figura A2 mostra o resultado da correlação cruzada entre os sinais das figuras A1 (a) e (b).

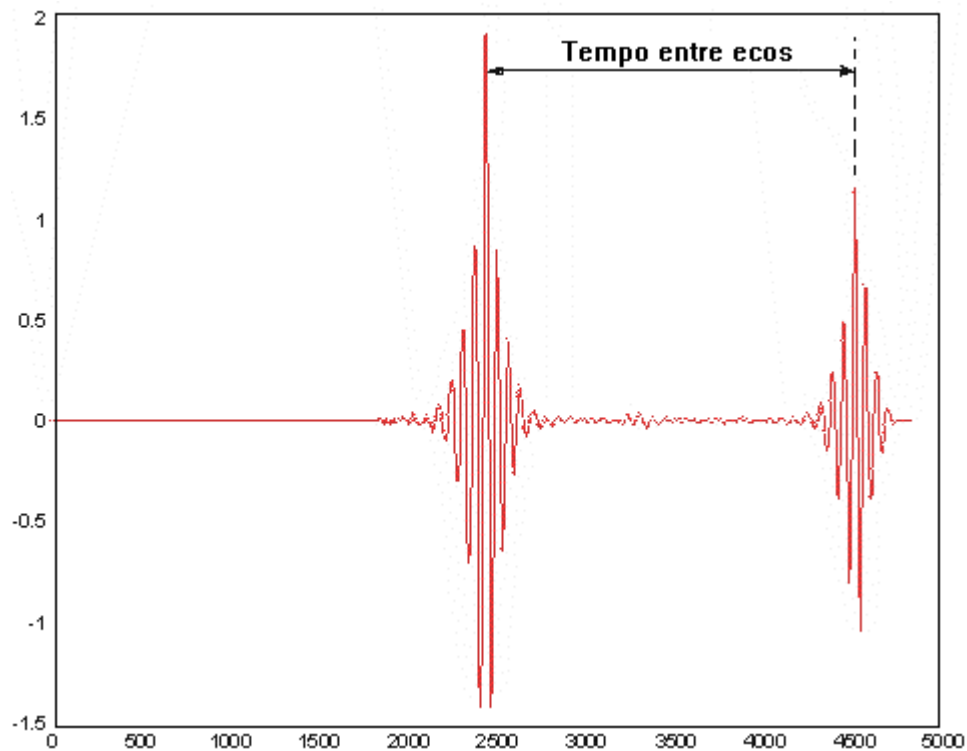


Fig. A2. Resultado da correlação cruzada entre os sinais.

Quando a correlação cruzada é aplicada significa que cada ponto de um sinal é multiplicado e somado a todos os outros pontos do outro sinal, resultando em uma outra função cujo máximo indica o valor do atraso entre os dois sinais. Além disso deve ser levado em consideração que a onda cisalhante ao se propagar em um material anisotrópico sofre a birrefringência, ou seja, é dividida em duas ondas de polarizações ortogonais e defasadas no tempo entre si, o que gera uma deformação nos ecos. A figura A3 mostra esta distorção. A medida que o tempo de percurso aumenta, aumenta também a defasagem entre as duas ondas e a deformação dos ecos subsequentes muda de lugar. Isto significa que dois ecos consecutivos são distorcidos de maneira diferente, isto é, em diferentes regiões do eco. Esse comportamento também pode ser uma outra fonte de erro nas medidas de tempo ao se utilizar dois pontos como

referência. Por outro lado a correlação cruzada elimina problemas dessa natureza uma vez que compara ponto a ponto o sinal inteiro [Bittencourt /2000].

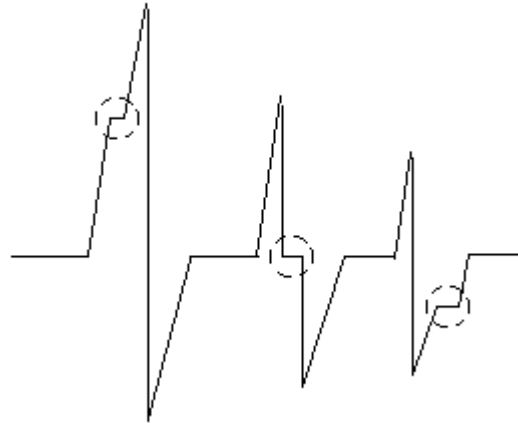


Fig. A3. Exemplo esquemático mostrando a deformação do eco (degrau) causada em ondas cisalhantes pela birrefringência [Bittencourt /2000].

## **Anexo B**

### **Programa de processamento de sinais**

Para o processamento do sinal ultra-sônico os sinais adquiridos não se constituíram de todos os níveis do sinal real, pois, o osciloscópio sofre uma limitação de memória de armazenamento o que influencia na quantidade total de níveis que ele pode armazenar. Isto é, se o sinal real fosse como no gráfico da fig. B.1 (a), um sinal representado no osciloscópio com 7 níveis, ficaria como no gráfico da fig. B.1 (b) e a diferença, a qual representa o ruído de quantização é mostrado na fig. B1 (c). No presente caso foram utilizados 256 níveis para representar discretamente um sinal analógico em torno de 0,03V de amplitude de pico, (veja fig. B.2). Devido a esta limitação de memória, a quantidade de pontos que o osciloscópio utiliza para representar o sinal adquirido também é finita. No caso foi possível armazenar até 2000 amostras por sinal lido.

Uma vez que o sinal é representado no osciloscópio, este pode ser transferido na forma de dados digitais para outro local de armazenamento, por exemplo, para um computador digital.

O sistema de leitura, o osciloscópio, deve ainda conseguir uma representação útil do sinal, isto é, a quantidade de pontos representados com no máximo 256 níveis, deve ser uma estimativa suficientemente exata do sinal original. No presente caso é necessário que as amostras correspondam a valores do sinal tomados com intervalos não maiores que 1ns, isto é, a taxa de amostragem exigida é  $\geq 1 \times 10^9$  /s (amostra/segundo). Com as informações aqui apresentadas é possível se caracterizar o erro decorrente de estimativas.

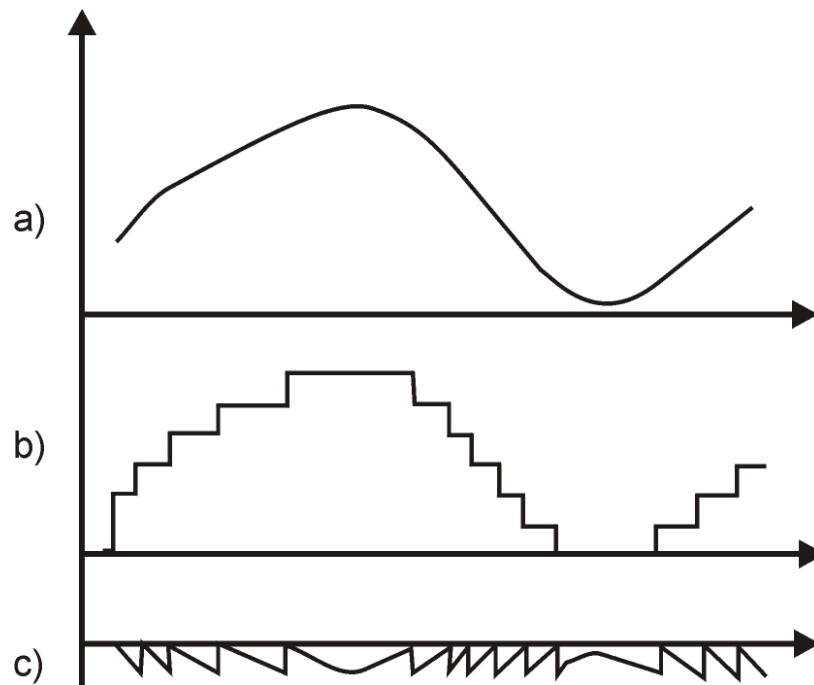


Fig. B.1. (a) Seção de sinais de entrada, (b) versão quantizada, (c) diferença, a qual representa o ruído de quantização.

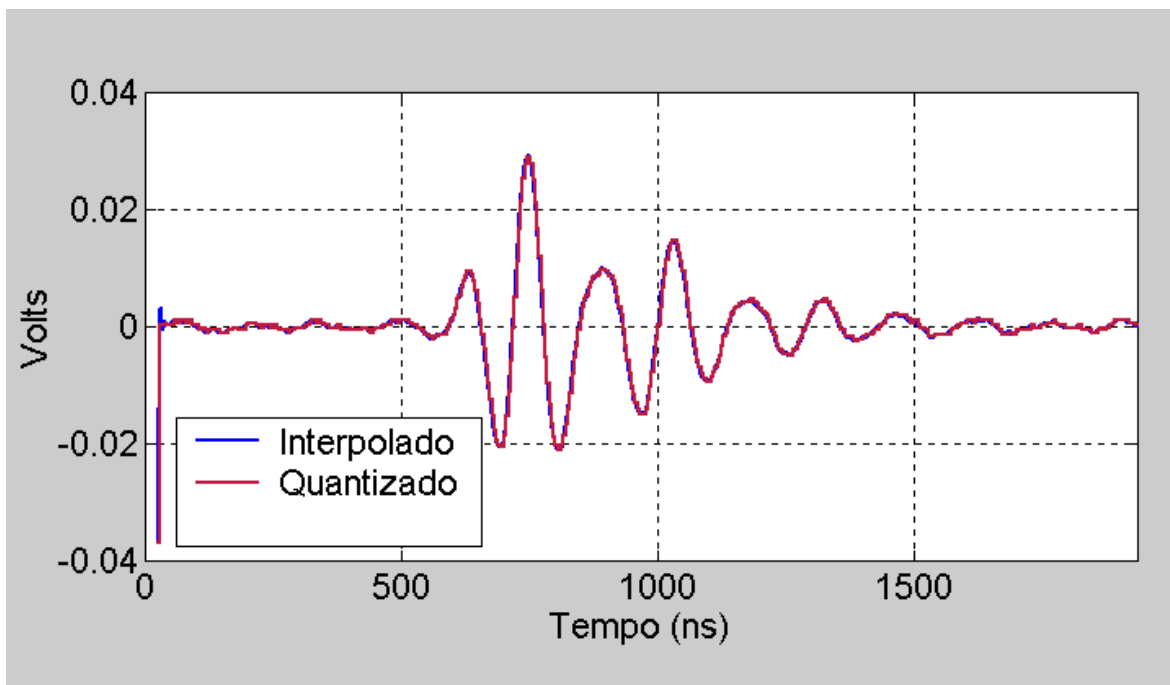


Fig. B.2. Representação dos níveis de um sinal analógico de 0,03 V de amplitude.

A taxa de amostragem expressa a taxa na qual são tomadas as amostras do sinal na entrada do conversor A/D (Analógico/Digital), que são armazenadas na memória para produzir um registro no domínio do tempo.

O tipo de erro de estimativas que se espera é como o apresentado no gráfico da fig. B.1(c). Observa-se que ele pode ser considerado um sinal triangular quando a quantidade de níveis é numerosa o suficiente para que entre dois instantes de amostragem o sinal real não mude muito rápido. Por esta razão, a velocidade de mudança do sinal real é um tópico importante que deve ser conhecido. Nas condições atuais o sinal não muda mais rápido do que a sua componente de Fourier mais rápida, aquela de 10MHz conforme se deduz do espectro de Fourier fornecido pelo fabricante do transdutor piezoelétrico. Fig. B.3.

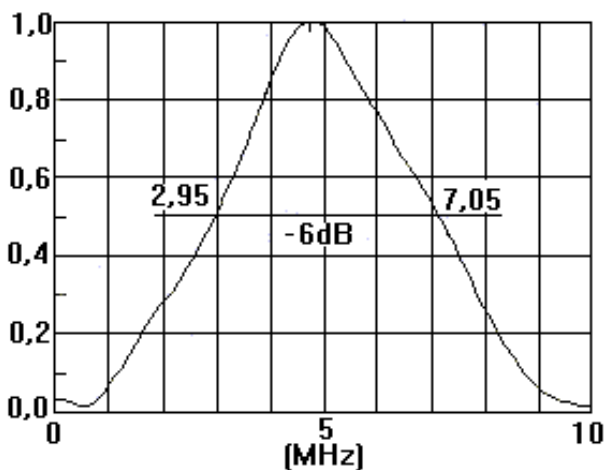


Fig. B.3. Espectro de Fourier fornecido pelo fabricante do transdutor piezoelétrico.

A fig. B.4 mostra a forma de onda do eco ao incidir na face posterior de uma amostra de sílica com 1" de espessura. (informação fornecida pelo fabricante do transdutor). Esta informação é importante pois é a forma de onda tomada como referência para o processamento digital do sinal.

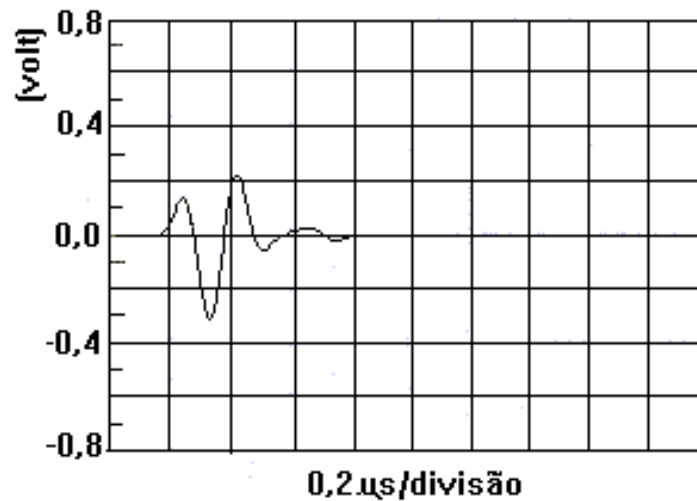


Fig. B.4. Forma de onda do eco do transdutor piezoelétrico.

A partir da suposição de sinal triangular para o sinal de erro pode se caracterizar estatisticamente o erro de estimativa. Pode-se dizer que o erro de estimativa tem um valor médio de  $\Delta/2 = 20\text{mV}$ , e um valor quadrático médio de  $\Delta^2/3 = 5,3752\mu\text{V}^2$ , onde,  $\Delta = E/(q-1) = 40\text{ mV}$ , (sendo "E" o máximo intervalo de valores que pode ser representado na escala do osciloscópio Tektronix /TDS 4020). Considerou-se  $E = 1,024\text{V}$ , pois, utilizou-se a escala de  $100\text{mV/divisão}$  (o osciloscópio tem 10,25 divisões verticais) e  $q = 256$  níveis, já que o osciloscópio tem uma palavra de comprimento igual a 8 bits [Brignell and White /1996].

Relatou-se acima a descrição do ruído de quantização. Faz-se abaixo alguns comentários sobre a consequência deste ruído.

Se as amostras são quantizadas, a incerteza inerente da amostragem somar-se-á à uma incerteza adicional de  $\pm 20\text{mV}$  que corresponde ao processo de quantização. Assim, teremos um sinal que pode ser expresso por:  $x = \text{valor real} \pm \text{incerteza da amostragem} \pm 20\text{mV}$ .

A taxa de amostragem real utilizada foi de 1 amostra a cada 4ns, posteriormente e após quantização, foram inseridas 3 amostras o que resultou em uma taxa de amostragem artificial de 1 amostra a cada nanosegundo, isto é, 1giga.amostra, o que equivale a mil milhões de amostras/s.

A máxima velocidade de mudança do sinal é de 112,53 mVolts/s, (fig. B.5) a qual é obtida do cálculo aproximado do máximo da derivada do sinal. Isto significa que em 4ns o sinal apenas pode mudar 450,13 pVolts, isto é, a incerteza na determinação da amplitude da onda associada ao processo de amostragem é de  $\pm 450,13$  pV. Após a quantização, a incerteza total será:  $x = \text{valor real} \pm 450,13 \text{ pV} \pm 20\text{mV}$ , onde se observa que a fonte maior de incertezas corresponde ao processo de quantização.

Para diminuir a incerteza total pode-se aumentar a taxa de amostragem ou inserir amostras artificiais entre as existentes, como foi feito, o que é conhecido como interpolação.

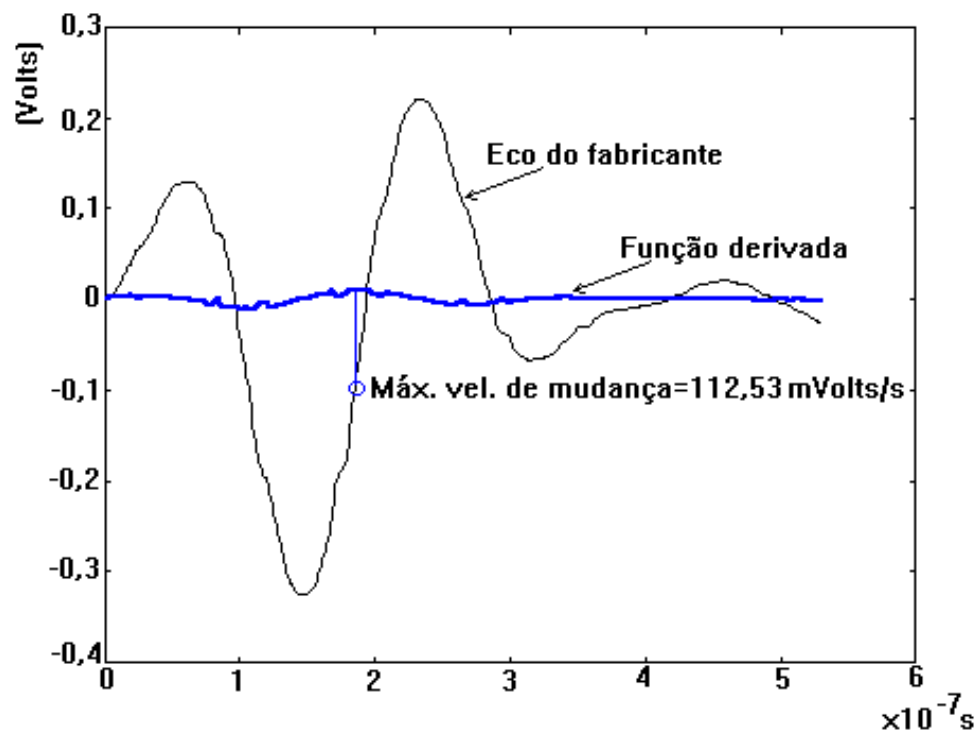


Fig. B.5. Eco fornecido pelo fabricante do transdutor e a função derivada correspondente.



Assim, o acréscimo de  $\pm 20\text{mV}$  da etapa de quantização é muito significativo ao comparar-se com  $\pm 450,13\text{ pV}$  de incerteza que o sinal amostrado já possui. Isto nos leva a considerar que a etapa de quantização deteriora o sinal para a taxa de amostragem mencionada, portanto, devem ser implementadas contramedidas.

A contramedida mais evidente consiste no uso de um filtro ou processo que impeça mudanças muito rápidas do sinal. Isto é, deve-se utilizar um filtro que limite o espectro do sinal quantizado eliminando-se as componentes de alta frequência. Isto pode ser feito a partir do conhecimento do espectro do sinal real. Em princípio, qualquer componente não pertencente ao sinal real pode ser eliminado sem problemas.

O aumento na taxa de amostragem (real) diminui diretamente a incerteza do processo de amostragem, mas não irá trazer uma diminuição na alturas dos degraus de quantização, já que estes dependem do conversor A/D utilizado.

Uma estratégia para diminuir os degraus pode ser a inserção, ao sinal quantizado, de amostras artificiais. As amostras artificiais são colocadas exatamente no lugar onde estariam as amostras do sinal real, se a amostragem fosse realizada a uma taxa maior. É de se esperar que a amplitude destas novas amostras em geral não coincidam com as das amostras reais. Sendo assim, são projetados dispositivos que, a partir da suposição de continuidade do sinal real que representa um fenômeno físico contínuo e do valor das amostras reais lidas, possam produzir amostras artificiais suficientemente exatas.

Na fig. B.6 mostra-se o sinal interpolado e quantizado medido num ponto da chapa antes de ser soldada. Os sinais quantizados são os que apresentam degraus de maior altura. Observa-se

que os degraus de altura próxima a  $3 \times 10^{-3}$  V, presentes no sinal quantizado, são os que foram previstos na análise anterior.

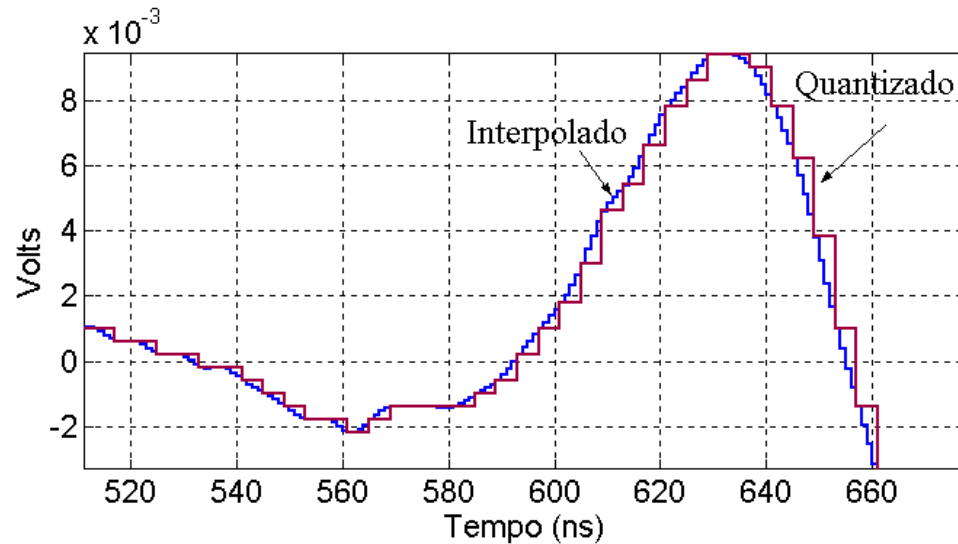


Fig. B.6. Seção do sinal quantizado e interpolado.

Utilizou-se um filtro para limitar a velocidade máxima de mudança do sinal lido conforme a velocidade máxima de mudança do sinal real. O efeito da filtragem, não mostrado, resulta numa curva que sobe cortando os degraus da figura acima aproximadamente no ponto médio (tanto no eixo x como no eixo y). Observa-se que, tanto na subida como na descida, a curva estará necessariamente à direita do começo de cada degrau. Sendo que, o começo de cada degrau medido no eixo x é determinado pelo instante de amostragem. Isto é, após a filtragem o sinal estará deslocado de aproximadamente 2ns quando o período de amostragem for de 4ns, e 0,5ns quando o intervalo de amostragem for de 1ns.

Quando a interpolação é realizada com mais amostras, a filtragem deixa de ter sentido, já que a curva interpolada estará bem próxima da curva original. A filtragem com interpolação insuficiente pode dar bons resultados apenas quando a forma de onda tiver degraus

aproximadamente iguais nas etapas de subida e descida, já que somente neste caso o atraso a ser introduzido será igual em cada degrau, porém, isto não acontece na prática.

Adicionalmente é preciso considerar que, ainda que os ecos aquisitados fossem idênticos exceto por uma atenuação, e que o começo de cada um deles estivesse sincronizado com os degraus, a quantização produziria uma imagem diferente de cada eco. Isto porque os degraus seriam diferentes em pontos similares de cada eco. Por outro lado, um aumento do número de amostras inseridas deixará de produzir, em algum momento, um sinal mais próximo do sinal real, já que os erros de estimativas existem sempre em cada amostra produzida sendo que, para um número maior de amostras serão introduzidos maiores defeitos na representação final do sinal.

A utilização da correlação posteriormente como método para obter o tempo entre ecos, não se mostrará especialmente sensível à presença de degraus de quantização, porém, o deslocamento mencionado acima pode introduzir incertezas dificilmente previsíveis. Pode ser demonstrado que a correlação age como filtro passabaixas. Uma simulação com um sinal piloto mostrou que a combinação de um filtro passa-faixa e um interpolador de ordem 3 junto com um correlacionador conseguem determinar exatamente o tempo entre ecos quando este for múltiplo do intervalo de amostragem. Se isto não ocorrer é preciso arredondar este valor. Por isso é que considerou-se que a incerteza da quantização foi eliminada e a resolução das medidas de tempo atingiram o valor desejado (1ns).

Para uma taxa de amostragem de  $1/(4\text{ns})$  juntamente com um comprimento de palavra de 8 bits, interpolação de 3 amostras, filtragem passabaixas do sinal interpolado, e até 2000 amostras utilizadas na correlação, concluiu-se que a incerteza do método foi de  $\pm 0,5\text{ns}$  na determinação dos valores de tempo e,  $\pm 450$  picovolts nos valores de amplitude. Poder-se-ia melhorar ainda mais a resolução, aumentando-se a taxa de interpolação, porém isto exigiria um aumento no

tempo de processamento, bem como, um aumento na capacidade de armazenamento das amostras no disco rígido do computador. Cabe ressaltar também que, o acréscimo nas taxas de interpolação não necessariamente trazem um aumento infinito na resolução, devido a que, o processamento digital, presente no cálculo da correlação e na filtragem dos sinais, introduzem incertezas e erros decorrentes da precisão finita com que são representados os valores numéricos no computador.